



TESIS DOCTORAL

**PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE BIODIESEL, ACEITES
VEGETALES Y SUS MEZCLAS CON GASOIL.
CORRELACIÓN CON OTRAS CARACTERÍSTICAS
FISICOQUÍMICAS Y SU APLICACIÓN A LA TECNOLOGÍA DE
BIOCOMBUSTIBLES**

AUTOR

ING. JULIÁN CORACH

DIRECTORA DE TESIS

DRA. ING. SILVIA DANIELA ROMANO – FIUBA.

Co-DIRECTOR DE TESIS

DR. ING. PATRICIO ANÍBAL SORICHETTI – FIUBA.

JURADO DE TESIS

DRA. SUSANA LARRONDO – FIUBA

DRA. PATRICIA INÉS LEONARDI – UNS

DRA. MARÍA LAURA PISARELLO MILESI – UNL

DR. JUAN CARLOS YORI – UNL

LUGAR DE TRABAJO

GER-ITHES, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, FACULTAD DE INGENIERÍA –
UBA, EN EL MARCO DE LA BECA DOCTORAL CONICET/PERUILH.

FACULTAD DE INGENIERÍA – UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

BUENOS AIRES, FEBRERO DE 2018

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT (RESUMEN EN INGLÉS).....	5
PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES EN CONGRESOS.....	6
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	8
CAPÍTULO II: BIODIESEL.....	17
CAPÍTULO III: DIELECTRICOS LÍQUIDOS.....	24
CAPÍTULO IV: ESPECTROSCOPIA DIELECTRICA.....	39
CAPÍTULO V: RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	50
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS, CORRELACIONES Y MODELOS.....	71
CAPÍTULO VII: CELDA PARA LA MEDICIÓN DE PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LÍQUIDOS.....	137
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....	147
ANEXOS.....	150

AGRADECIMIENTOS

- A Daniela Romano y Patricio Sorichetti
- A Eriel Fernández Galván
- A Víctor Lepera
- A Miguel Pellejero y Sergio Bergerman
- A Eduardo Acosta
- A Rubén Gayoso
- A Martina Colman
- A Pilar Balbi
- A Martín Arolfo
- A Miguel Laborde
- A mi familia
- A mi psicóloga, Marisa Hourbeigt
- A mis perros, Jaime Corach y Pedro Corach

RESUMEN

En esta tesis se estudiaron las propiedades eléctricas de biodiesel, aceites vegetales, gasoil y sus mezclas, en función de la frecuencia, la temperatura y la composición. La determinación de las propiedades eléctricas se realizó en el rango de frecuencias de 20Hz a 2MHz, a temperaturas entre 298K y 343K, y en el rango completo de composiciones.

A partir de los resultados experimentales, se propusieron modelos para relacionar las propiedades eléctricas de las sustancias estudiadas con la temperatura y la composición.

Para los sistemas biodiesel/gasoil y biodiesel/aceite de soja, se desarrollaron modelos que permiten estimar la composición de las mezclas a partir de mediciones de temperatura y permitividad. En el caso del sistema biodiesel/gasoil, también se desarrolló un modelo para estimar la viscosidad cinemática en función de la permitividad y la temperatura, en el rango completo de composición.

Se diseñó, construyó y caracterizó una celda de acero inoxidable para mediciones de propiedades eléctricas en biocombustibles que permite superar algunas limitaciones de las celdas comerciales previamente utilizadas en el laboratorio.

A partir de los resultados experimentales, se determinaron los rangos típicos de los valores de las propiedades eléctricas y su dependencia con la temperatura, para biodiesel, aceites vegetales, gasoil y las mezclas biodiesel/gasoil y biodiesel/aceite de soja. Asimismo, se presentan correlaciones entre las propiedades eléctricas y otras propiedades fisicoquímicas de interés, como la composición, la viscosidad cinemática y la velocidad del sonido.

ABSTRACT

In this thesis, the electrical properties of biodiesel, vegetable oils, gas oil and their mixtures were studied, as a function of frequency, temperature and composition. The determination of the electrical properties was carried out in the frequency range from 20Hz to 2MHz, at temperatures between 298K and 343K, in the full range of compositions.

From the experimental results, models were proposed to relate the electrical properties of the substances studied with the temperature and composition.

For the biodiesel/gasoil and biodiesel/soybean oil systems, models were developed to estimate the composition of the mixtures based on temperature and permittivity measurements. In the case of the biodiesel/gasoil system, a model was developed to estimate the kinematic viscosity as a function of permittivity and temperature, in the full range of composition.

A stainless steel cell for measurements of electrical properties in biofuels was designed, built and characterized. This makes possible to overcome some limitations of the commercial cells previously used in the measurements at the laboratory.

From the experimental results, the typical value ranges of electrical properties of biodiesel, vegetable oils, diesel fossil fuel, biodiesel/diesel fossil fuel blends and biodiesel/soybean oil blends were determined, together with their temperature dependence. In addition, correlations are presented between electrical properties and other physico-chemical properties, such as composition, kinematic viscosity and speed of sound.

PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES EN CONGRESOS

A continuación se listan las publicaciones y presentaciones en congresos realizados en el marco de esta tesis doctoral.

Publicaciones en revistas internacionales con referato

- Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Electrical properties of vegetable oils between 20Hz and 2MHz. Int J Hydrogen Energy 2014;39:8754–8758.
- Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Electrical and ultrasonic properties of vegetable oils and biodiesel. Fuel 2015;139:466-471.
- Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Permittivity of biodiesel-rich blends with fossil diesel fuel: Application to biodiesel content estimation. Fuel 2016;177:268-273.
- Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Permittivity of diesel fossil fuel and blends with biodiesel in the full range from 0% to 100%: Application to biodiesel content estimation. Fuel 2017;188:367-373.
- Corach J, Colman M, Sorichetti PA, Romano SD. Kinematic viscosity of soybean biodiesel and diesel fossil fuel blends: Estimation from permittivity and temperature. Fuel 2017;207:488-492.

Publicaciones en revistas nacionales con referato

Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Propiedades eléctricas de metilésteres obtenidos de aceites vegetales entre 20Hz y 2MHz. Revista de Ciencia y Tecnología 2014;21:47-52.

Presentaciones realizadas en congresos

“Propiedades eléctricas de aceites vegetales en el rango de frecuencias de 20Hz a 2MHz”. Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía (HYFUSEN) 2013. Córdoba, Argentina, 10-14 de junio de 2013.

“Mediciones de espectroscopía dieléctrica y ultrasonido de aceites vegetales y biodiesel”. Corach J, Sorichetti PA, Romano SD, Acosta EO. XIX Congreso de fisicoquímica y química inorgánica de la Asociación Argentina de Investigación Fisicoquímica. Buenos Aires, Argentina, 12 a 15 de abril de 2015.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Desde la Primera Revolución Industrial hasta el presente ha habido un incremento muy rápido de la demanda de energía por parte de la población mundial [1,2]. En particular, durante el siglo XX se vivieron una serie de transformaciones en los ámbitos político, económico, social y tecnológico, que aceleraron el consumo de energía a nivel global [1,3,4]. La producción en masa permitió que la tecnología fuese haciéndose cada vez más presente en la vida cotidiana (automóviles, electrodomésticos, calefacción e iluminación residencial, iluminación pública, etc.), resultando en un crecimiento de la demanda de energía en los sectores residenciales, comerciales e industriales [4,5,6,7]. Tal crecimiento se produjo, en general, de forma descontrolada y sin cabal conciencia de los daños que conllevaba, y se sostuvo a base de recursos no renovables de origen fósil [2,6,8].

Las principales fuentes utilizadas para satisfacer la demanda energética son el carbón, el gas natural y el petróleo, tanto para aplicaciones como calefacción, iluminación, etc., como en motores (ferrocarriles, barcos, automóviles, etc.) [2,7]. Los hidrocarburos de origen fósil son también utilizados para producir una innumerable cantidad de productos químicos industriales (plásticos, solventes, alcoholes, brea, pigmentos, pegamentos, etc.) [9].

La utilización en gran escala de hidrocarburos afecta el medio ambiente tanto de forma directa como indirecta [4,10]. Algunos de los ejemplos más resonantes incluyen la contaminación de la atmósfera y de cuerpos de agua, el daño a los ecosistemas, la deforestación de grandes bosques [2], la reducción de la capa de ozono [11], el efecto invernadero, etc.

Hacia la segunda mitad del siglo XX, algunos sectores comenzaron a tomar conciencia de la delicada situación, y, tanto la problemática ambiental *per se*, como el uso eficiente de la energía, tomaron cada vez más relevancia [12,13]. En efecto, hoy en día se tiene plena conciencia de los dos principales problemas asociados al uso de fuentes de energías no renovables: son agotables y alteran el medioambiente [14].

Las problemáticas ambientales y de eficiencia energética impulsan importantes debates en el ámbito político, cultural y económico, sobre todo en los países desarrollados [8].

Incluso motivaron el surgimiento de partidos políticos de corte marcadamente ambientalista, como el caso de “los Verdes” de Alemania hacia 1970 [15], y de organizaciones no gubernamentales (ONGs), como *Greenpeace* [16].

El control de la producción de petróleo se convirtió en un factor de presión en los conflictos geopolíticos hacia la década del 60'. Esto se vio reflejado en algunos casos emblemáticos como la guerra civil en Nigeria (secesión de Biafra), el embargo petrolero de los países Árabes, y las guerras civiles en Angola y Mozambique [17].

La problemática expuesta explica el inicio de las investigaciones de energías renovables, principalmente en Estados Unidos de América pero también en Brasil (donde en 1975 comenzó un plan denominado “Proálcool”, cuyo objetivo era utilizar mezclas de nafta con etanol como combustible a gran escala) y en Israel (donde se desarrollaron termotanques solares) [18]. De esa época datan estudios de fuentes de energía renovables, principalmente en universidades de EEUU [19,20,21]. La energía nuclear también fue vista como una alternativa al uso de carbón y derivados del petróleo para producir energía eléctrica y algunos países la adoptaron como una importante fuente de la matriz energética, como Francia [22].

Las energías renovables utilizadas para la producción de electricidad que mayor desarrollo experimentaron fueron la eólica y la solar. En lo que respecta al transporte, la atención se centró hacia los biocombustibles, los automóviles eléctricos y el hidrógeno.

Los biocombustibles que alcanzaron más desarrollo y uso en el sector del transporte fueron, sin lugar a duda, el biodiesel [18,23,24] y laalconafta. Actualmente el biodiesel es uno de los principales biocombustibles utilizados en el rubro de transporte a nivel mundial [18]. De allí que en las dos últimas décadas se haya visto una expansión importantísima de su estudio.

Se mencionan a continuación algunos hitos en la historia del biodiesel [18]: en 1937 se aprobó una patente belga [25]; en 1977, se patentó en Brasil el primer proceso industrial para la producción de biodiesel [26]; en 1979 Sudáfrica comenzó a llevar a cabo investigaciones para producir biodiesel a partir de aceite de girasol [18]. En particular, en 1983 se publicó un procedimiento para la producción de biodiesel [27]. A partir de ese trabajo, una compañía austriaca, Gaskos, obtuvo de Sudáfrica el “*know-how*” para la producción de biodiesel a nivel industrial y construyó en 1989 la primera planta destinada a la producción de biodiesel de colza, con una capacidad de 30.000 toneladas anuales [18]. Durante la década del 90' se construyeron numerosas fábricas en Europa

(República Checa, Francia, Alemania, etc.) y, a partir del siglo XXI, las mismas se extendieron a todo el mundo. En Estados Unidos de América se produjo biodiesel con fines comerciales por primera vez en 1991.

En Argentina, las primeras fábricas de biodiesel fueron instaladas en 2006 [28]. La producción de biodiesel, ya superaba las 500.000 toneladas anuales en 2008. En la Figura 1.1 se muestra la producción, las exportaciones y el consumo interno de biodiesel en Argentina desde el año 2008 hasta el año 2016 [29].

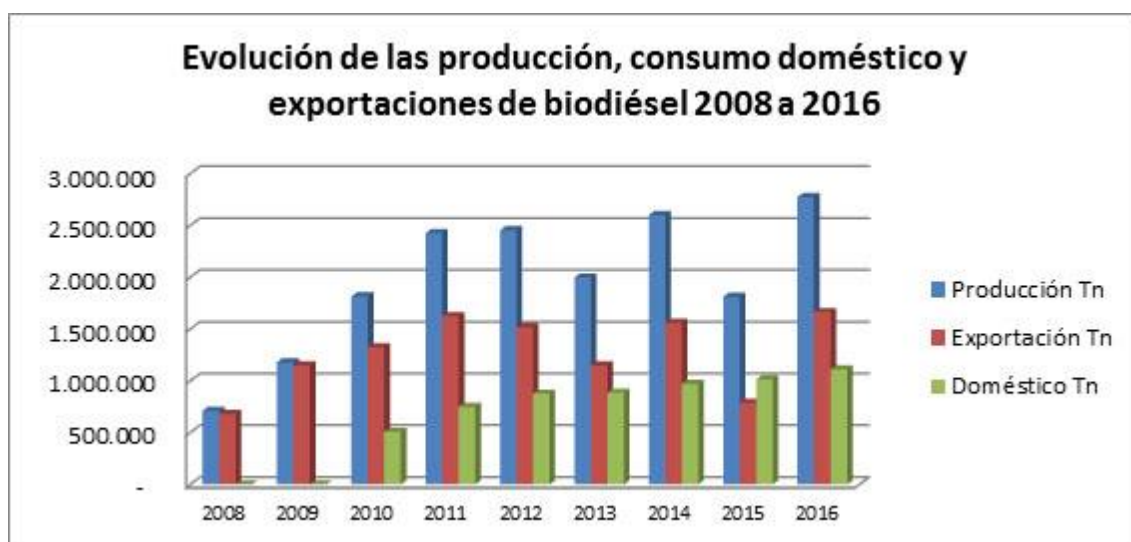


Figura 1.1 - Evolución de la producción, exportaciones y consumo interno de biodiesel en Argentina. Fuente: Cámara Argentina de Biocombustibles, CARBIO.

En la actualidad el biodiesel es utilizado a gran escala mezclado con gasoil de origen fósil [18,23,24,28]. Esta política ha sido adoptada por muchos países para disminuir el impacto de las emisiones de dióxido de carbono y azufre, y se da en el marco de planes cuya finalidad es estimular el uso de energías renovables. El porcentaje de mezcla (denominado en la jerga “corte”) es regulado por ley y depende de cada país.

La caracterización del biodiesel se lleva a cabo a través de métodos establecidos en estándares internacionales [18,23,24,28] y normas nacionales, las cuales están basadas en general en los primeros. La caracterización consiste en la medición de 24 propiedades físicas y químicas, algunas de las cuales demandan largos tiempos de medición y requieren equipos costosos y personal especializado [18,23,24,30]. Además, no son adecuadas para mediciones *online* [24,31,32]. Si bien esto no es una limitación

para grandes productores de biodiesel, sí lo es para pequeños y medianos productores y para aplicaciones que demanden mediciones en tiempo real [24]. Por ejemplo, para determinar la eficiencia de la transesterificación se realiza una cromatografía sobre el producto final. Esta técnica demanda tiempos largos de medición, altos costos, personal especializado, y su aplicación a mediciones *in situ* no resulta práctica [30,31,32,33,34,35,36]. Por otro lado, otras aplicaciones demandan mediciones en tiempo real [30], como por ejemplo la determinación de la composición del combustible en el tanque, a fin de mejorar el desempeño de los sistemas de inyección y consecuentemente del motor [18,37]. Teniendo en cuenta que la composición del combustible del tanque varía a medida que el mismo es consumido y recargado, se ve la necesidad de contar con métodos que permitan estimar la composición del combustible en tiempo real [18,37,38].

También es deseable contar con técnicas que permitan detectar muestras adulteradas [30,38], como aceite vegetal en biodiesel (por adulteración o transesterificación incompleta) [39] o mezclas biodiesel/gasoil con una cantidad de biodiesel menor a la prescrita por ley [30,33].

Por lo expuesto, la aplicación de técnicas alternativas, precisas, económicas y rápidas que complementen aquellas establecidas en los estándares internacionales, resulta de interés tecnológico para la caracterización de biodiesel y sus mezclas con gasoil o aceites vegetales [18,24,30,31,32,33,36,38,40,41]. En particular, la espectroscopía dieléctrica permite la caracterización de biodiesel, aceites vegetales y gasoil de forma simple, rápida, a bajo costo y en tiempo real [24].

En este trabajo se presenta un estudio experimental sistemático de las propiedades eléctricas de biodiesel, aceites vegetales, gasoil y sus mezclas.

A partir de los resultados experimentales se determinó la dependencia de las propiedades eléctricas con la temperatura y los rangos típicos de valores de biodiesel, aceites vegetales, gasoil y de las mezclas biodiesel/gasoil y biodiesel/aceite de soja. Asimismo, se presentan correlaciones entre las propiedades eléctricas y otras propiedades de importancia fundamental para la combustión, como la composición, la viscosidad cinemática y la velocidad del sonido. En particular, se propusieron modelos matemáticos simples para relacionar las propiedades eléctricas con la temperatura y la composición en las mezclas biodiesel/gasoil y biodiesel/aceite de soja. En el caso del sistema biodiesel/gasoil, también se desarrolló un modelo para estimar la viscosidad

cinemática en el rango completo de composición en función de la permitividad y la temperatura.

REFERENCIAS

- [1] Farr JR. Industrial Revolution in Europe. 1750-1914. Ed. Thomson Gale, New York, 2003.
- [2] Bithas K, Kalimeris P. Revisiting the Energy-Development Link. A Brief History of Energy Use in Human Societies. Springer, Londres, 2016.
- [3] Bilgen S. Structure and environmental impact of global energy consumption. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014;38:890-902.
- [4] Shay EG. Diesel fuel from vegetable oils: Status and opportunities. Biomass and Bioenergy 1993;4(4):227-242.
- [5] Geng Y, Chen W, Liu Z, Chiu ASF, Han W, Liu Z, Zhong S, Qian Y, You W, Cui X. A bibliometric review: Energy consumption and greenhouse gas emissions in the residential sector. Journal of Cleaner Production 2017;159:301-316.
- [6] Caineng Z, Qunb Z, GuoshengZ, Bo Z. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. Natural Gas Industry B 2016;3:1-11.
- [7] Pablo-Romero MP, Pozo-Barajas R, Yñiguez R. Global changes in residential energy consumption. Energy Policy 2017;101:342-352.
- [8] Deutch J. Decoupling Economic Growth and Carbon Emissions. Joule 2017;1:3-9.
- [9] Wojtkowiak B. Historia de la Química. Ed. ACRIBIA, Zaragoza, 1987.
- [10] Dhillon RS, von Wuehlisch G. Mitigation of global warming through renewable biomass. Biomass and Energy 2013;48:75-89.

- [11] Kane RP. Is ozone depletion really recovering? *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 2088;70:1455-1459.
- [12] Wulfinghoff DR. *Energy efficiency manual*. Energy Institute Press, Maryland, 1999.
- [13] Sudhakara Reddy B, Assenza GB, Assenza D, Hasselmann F. *Energy Efficiency and Climate Change*. SAGE, Los Angeles, 2009.
- [14] Bueno AV, Bento Pereira MP, Victor J. Performance and emissions characteristics of castor oil biodiesel fuel blends. *Applied Thermal Engineering* 2017;125:559-566.
- [15] Página web oficial del Partido Verde de Alemania.
<https://www.gruene.de/ueber-uns/gruene-chronik.html>
- [16] Página web oficial de Greenpeace: <http://www.greenpeace.org>
- [17] DeRouen KR, Uk H. *Civil wars of the world*. ABC CLIO, Santa Barbara, EEUU, 2007.
- [18] Knothe G, Krahel J, van Gerpen J. *The Biodiesel Handbook* 2nd Edition. Ed. Urbana: AOCS Press, Urbana, 2011.
- [19] Silvis, TW. *Waste Vegetable Oil as a Diesel Fuel*. Tesis de Maestría, Ohio State University, 1977.
- [20] Fishinger, MKC. *Service Trial of Waste Vegetable Oil as a Diesel Fuel Supplement*. Tesis de Maestría, Ohio State University, 1980.
- [21] Fishinger, MKC, Engelman WH, Guenther DA. *Service Trial of Waste Vegetable Oil as a Diesel Fuel Supplement*. SAE Technical Paper Series 811215, 1981.

- [22] Maïzi N, Assoumou E. Future prospects for nuclear power in France. *Applied Energy* 2014;136:849-859.
- [23] Romano SD, González Suárez E, Laborde MA. *Combustibles alternativos*. 2nd ed. Buenos Aires: Ediciones Cooperativas, 2006.
- [24] Romano SD, Sorichetti PA. *Dielectric relaxation spectroscopy in biodiesel production and characterization*. Springer Verlag, Londres, 2011.
- [25] Chavanne, CG. Procédé de Transformation d'Huiles Végétales en Vue de Leur Utilisation comme Carburants. Patente belge 422877, 1937.
- [26] Parente, E. Processo de Produção de Combustíveis a partir de Frutos ou Sementes Oleaginosas. Patente brasileira PI – 8007957, 1983.
- [27] SAE Technical Paper series no. 831356. SAE International Off Highway Meeting, Milwaukee, 1983.
- [28] Romano SD. Biocombustibles líquidos en la Argentina. En *Energía: Investigaciones en América del Sur*. Editorial de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 2017.
- [29] Página oficial de la Cámara Argentina de Biocombustibles (CARBIO) <http://carbio.com.ar/index.php/exportaciones/>
- [30] Kung Y, Hsieh B, Cheng T, Huang C, Chen RLC. Impedimetric sensing of the biodiesel contents in diesel fuels with a carbon paste electrode pair. *Fuel* 2012;102:724-728.
- [31] Killner MHM, Rohwedder JJR, Pasquini C. A PLS regression model using NIR spectroscopy for on-line monitoring of the biodiesel production reaction. *Fuel* 2011;90:3268-3273.

- [32] Moreira de Lima S,b, Alves Silva BF, Vieira Pontes D, Fernandes Pereira C, Stragevitch L, Pimentel MF. In-line monitoring of the transesterification reactions for biodiesel production using NIR spectroscopy. *Fuel* 2014;115:46-53.
- [33] De Souza JE, Scherer MD, Cáceres JAS, Caires ARL, M'Peko JC. A close dielectric spectroscopic analysis of diesel/biodiesel blends and potential dielectric approaches for biodiesel content assessment. *Fuel* 2013;105:705-710.
- [34] Pinzi S, Alonso F, García Olmo J, Dorado MP. Near infrared reflectance spectroscopy and multivariate analysis to monitor reaction products during biodiesel production. *Fuel* 2012;92:354-359.
- [35] Bezerra de Lira LF, Vera Cruz de Vasconcelos F, Fernandes Pereira C, Silveira Paim AP, Stragevitch L, Pimentel MF. Prediction of properties of diesel/biodiesel blends by infrared spectroscopy and multivariate calibration. *Fuel* 2010;89:405-409.
- [36] Zhang W. Review on analysis of biodiesel with infrared spectroscopy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012;16:6048-6058.
- [37] Jakoby B, Herrmann F. Chemical Sensors for Liquid Media. En "Sensors for automotive Applications". Göpel W, Hesse J, Zemel JN, editores. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2013.
- [38] Scheider JC. Fuel composition and quality sensing for diesel engines. Tesis de Maestría. Universidad de Illinois, Urbana-Champaign, 2011.
- [39] Paiva EM, Rodrigues Rohwedder JJ, Pasquini C, Pimentel MF, Fernandes Pereira C. Quantification of biodiesel and adulteration with vegetable oils in diesel/biodiesel blends using portable near-infrared spectrometer. *Fuel* 2015;160:57-63.
- [40] Sarangi MA. Oil debris detection using capacitance and ultrasonic measurements. Tesis de Maestría, Universidad de Akron, 2007.

[41] Cataldo A, Piuzzi E, Cannazza G, De Benedetto E. Dielectric Spectroscopy of Liquids Through a Combined Approach: Evaluation of the Metrological Performance and Feasibility Study on Vegetable Oils. IEEE Sensors Journal 2009;10(9):1226-1233.

CAPÍTULO II: BIODIESEL

En este capítulo se describe la historia del biodiesel, su producción y utilización, sus ventajas y desventajas y las materias primas empleadas en su producción.

II.1. ACEITES VEGETALES, METILÉSTERES Y BIODIESEL

Las primeras experiencias con motores Diesel se llevaron a cabo hacia 1890, utilizando aceite de maní como combustible [1,2,3,4]. Debido a la alta viscosidad cinemática de los aceites vegetales, su utilización en motores Diesel produce algunos inconvenientes técnicos que llevaron al desarrollo de distintos métodos para disminuir su viscosidad [1,2,5,6,7]. Los métodos utilizados son pirólisis, mezcla con gasoil, microemulsificación y transesterificación, siendo la última el proceso más extendido en la industria [1,3,8,9].

Las muestras estudiadas en esta tesis fueron obtenidas mediante transesterificación, por lo cual la misma será descrita en este capítulo. Antes se dará una breve descripción de ciertos aspectos de los aceites vegetales.

II.2 ACEITES VEGETALES

Los aceites vegetales y las grasas animales están principalmente constituidos por triglicéridos [1,3,5,6,9]. En la Figura 2.1 se muestra un esquema de la estructura molecular de un triglicérido. Los grupos R_1 , R_2 y R_3 representan la cadena del ácido graso que se esterificó con la glicerina.

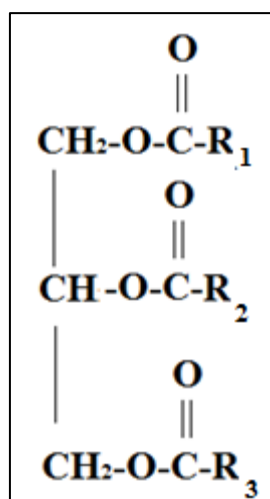


Figura 2.1 - Esquema de una molécula de triglicérido.

Los triglicéridos presentes en los aceites vegetales y en las grasas animales provienen de la esterificación de una variedad de ácidos grasos con glicerina [1,3,5,6]. La proporción en la cual están presentes los ácidos grasos se conoce como “perfil de ácidos grasos” del aceite o grasa. El perfil de ácidos grasos determina las propiedades físicas y químicas de los aceites vegetales y de las grasas animales [1,3,5,6,9]. Los ácidos grasos presentes en los aceites vegetales y las grasas animales tienen un número de átomos de carbono que oscila entre 12 y 22 (láurico y erúcico, respectivamente) [5].

Los ácidos grasos pueden ser saturados (aquellos en los cuales los enlaces entre átomos de carbono son simples) o insaturados (aquellos en los cuales hay al menos un doble o triple enlace) [5]. Esta es una de las clasificaciones más significativas de los ácidos grasos, ya que el grado de saturación incide fuertemente en propiedades importantes, como la viscosidad del aceite o de la grasa que formen [5]. Por ejemplo, las grasas animales tienden a estar en estado sólido a temperatura ambiente por provenir de ácidos grasos saturados, mientras que los aceites vegetales suelen estar en estado líquido por provenir de ácidos grasos insaturados [3,5]. Algunos de los ácidos grasos más comúnmente encontrados en los aceites vegetales y en las grasas animales son el oleico, linoleico, linolénico (ácidos grasos insaturados) y el palmítico y esteárico (ácidos grasos saturados) [3,5].

Como se mencionó antes, si bien los aceites vegetales pueden utilizarse en motores Diesel (y de hecho han sido utilizados en el pasado) [1,3,5,6,7], su alta viscosidad constituye una limitación muy importante ya que acarrea inconvenientes técnicos en los

motores [1,3,5,6,7]. Por ejemplo, dificultades en la pulverización del combustible y consecuentes problemas de combustión y formación de residuos en el motor [1,3,5,6,7]. En consecuencia, los aceites vegetales son sometidos a distintos procesos para obtener sustancias con menor viscosidad, las cuales son más fácilmente pulverizables.

El biodiesel se produce industrialmente a través de una reacción denominada transesterificación [1,3,5,6]. Los reactivos de la misma son un aceite vegetal o una grasa animal (triglicéridos) y un alcohol de cadena corta (en particular, metanol o etanol), mientras que los productos son otro alcohol de cadena corta (glicerol) y ésteres de menor masa molar (metílicos o etílicos) [1,3,5,6].

En la Figura 2.2 se esquematiza la transesterificación. En la misma se observa, del lado de los reactivos, el aceite vegetal o grasa y un alcohol de cadena corta, y, del lado de los productos, la mezcla de ésteres y glicerol.

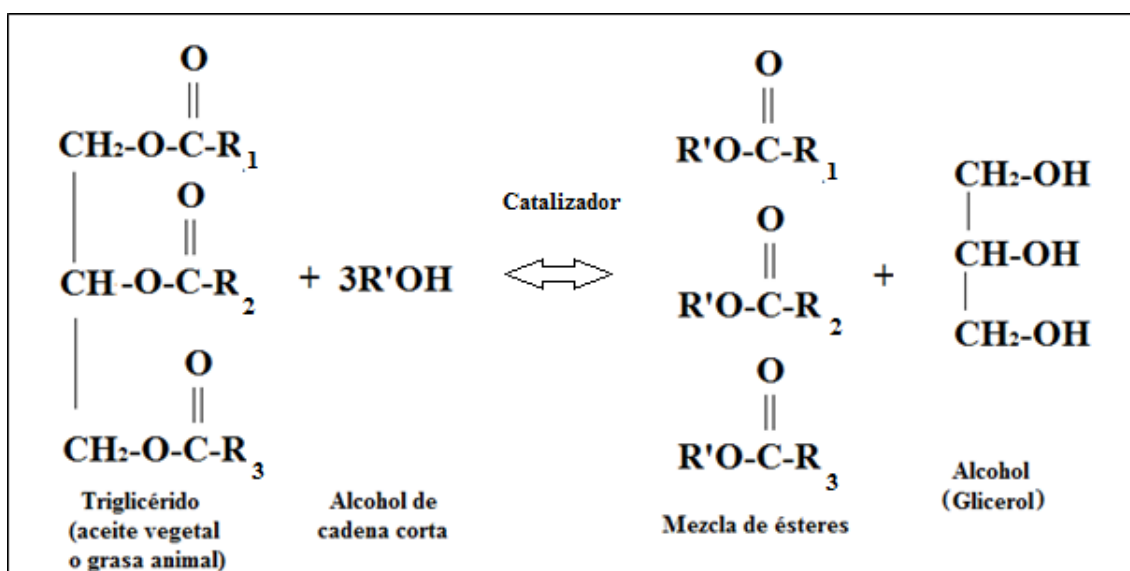


Figura 2.2 - Esquema de la reacción de transesterificación.

Como resultado de la transesterificación se obtiene una mezcla de ésteres. Si la mezcla de ésteres es debidamente tratada y purificada de modo que satisfaga los estándares internacionales (ASTM D 6751 o EN 14214), podrá ser denominada “biodiesel” [1,5,6]. Debido a ciertas ventajas técnicas en el proceso y a su menor costo, el alcohol utilizado normalmente en la transesterificación es el metanol [1,5,6]. Por ende, los ésteres así

obtenidos son denominados “metilésteres”. Si se utiliza etanol, los ésteres obtenidos se denominan “etilésteres”.

Si bien es posible utilizar otros alcoholes para obtener biodiesel, las limitaciones impuestas por los estándares de calidad actuales solamente pueden ser satisfechas por los metilésteres [1].

Aunque la estequiometría de la reacción de transesterificación requiere una relación molar alcohol/aceite de 3:1 (como se indicó en la Figura 2.2), en la práctica se utiliza una relación de 6:1 para lograr una reacción de alto rendimiento. Esto se debe a que la transesterificación es una reacción de equilibrio, de modo que se incrementa la proporción de reactivos para desplazar la reacción misma hacia los productos [1,3,5,6,].

II.3. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

La Figura 2.3 muestra un esquema simplificado del proceso para la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales con bajos niveles de ácidos grasos libres [1].

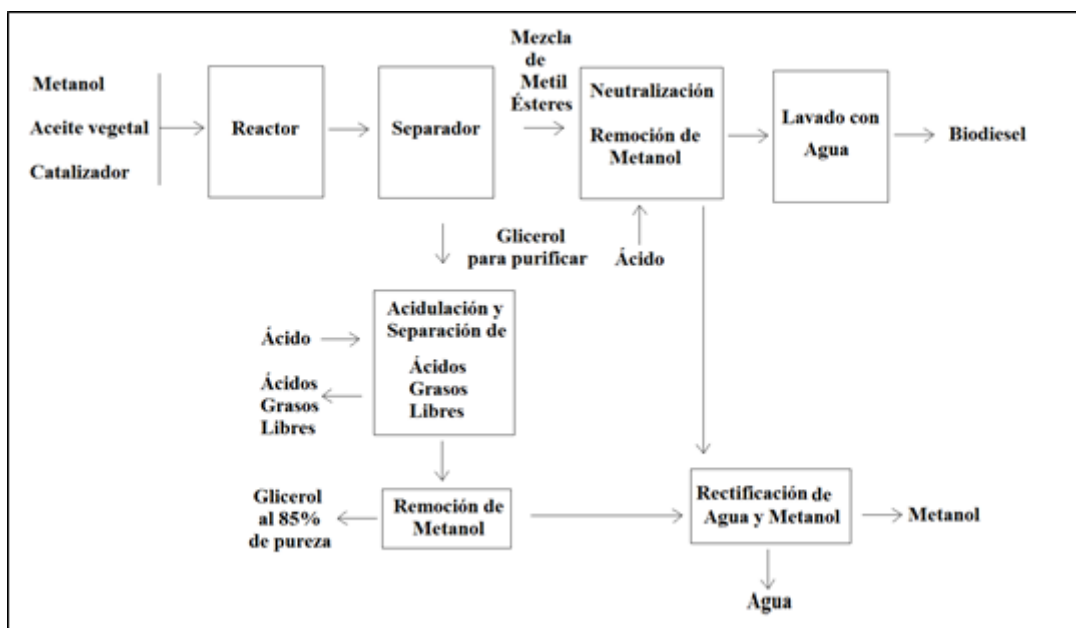


Figura 2.3 - Esquema del proceso de producción de biodiesel [1].

La transesterificación puede llevarse a cabo en una o dos etapas [1]. En la reacción en una etapa, se mezcla primero el alcohol y el catalizador, y luego el aceite vegetal en el

reactor y se los agita durante aproximadamente 1 hora a 333K. En la reacción en dos etapas, se mezcla el aceite vegetal con aproximadamente el 80% del alcohol+catalizador. Luego se remueve el glicerol y comienza la segunda etapa de mezclado, en otro reactor, con el restante 20% de alcohol+catalizador. La producción en dos etapas lleva a una conversión mayor y requiere menor cantidad de alcohol que el proceso de una única etapa [1].

Una vez finalizada la transesterificación se forman dos fases, siendo la fase más liviana la mezcla de metilésteres, y la más densa glicerol. La separación de ambas fases se lleva a cabo con un tanque de decantación o bien con un proceso de centrifugación. El alcohol en exceso se elimina una vez que las fases de glicerol y metilésteres han sido separadas para evitar que la transesterificación se revierta. Finalizada la separación, se agrega ácido a la mezcla de metilésteres para neutralizar el catalizador.

En la etapa de lavado con agua se eliminan los restos de catalizador, jabón, sales, glicerol libre y metanol. Finalmente, el biodiesel se somete a un proceso de vacío flash para eliminar el exceso de agua. En cuanto al glicerol, el mismo se encuentra mezclado con catalizador y metanol. En esas condiciones, el mismo es un desecho peligroso, por lo que debe ser sometido a tratamientos de purificación para que pueda ser comercializado como materia prima en diversas ramas de la industria.

Los catalizadores utilizados pueden ser ácidos y básicos [1,3,5,6], pero en los procesos industriales lo más común es utilizar básicos, en particular, metóxido de sodio.

II.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL BIODIESEL

En cuanto a las ventajas puede mencionarse que el biodiesel es renovable, biodegradable, no tóxico, presenta entre un 30% y un 93% menos de emisiones contaminantes (a excepción de los NO_x) [2,3], no produce dióxido de azufre y puede producirse a partir de aceites y grasas usadas [1,3,5,6]. Su transporte y almacenamiento es más seguro que el del gasoil ya que tiene un *flashpoint* más elevado [1,5,6]. Por último, en cuanto a ventajas técnicas, el biodiesel puede utilizarse en motores Diesel puro o mezclado con gasoil (en cualquier proporción) con mínimas modificaciones en los motores y tiene excelentes propiedades lubricantes [1,5,6].

En cuanto a las desventajas ambientales, las emisiones de NO_x aumentan entre un 1% y un 15% dependiendo del tipo de motor y del biodiesel, siendo el aumento, en general,

del 5% [5]. En el aspecto económico, su costo es comparativamente mayor que el del gasoil [1,5,6]. Respecto a las cuestiones técnicas, su viscosidad es más alta que la del gasoil [1], su utilización reduce levemente la potencia del motor (ya que su poder calorífico es menor que el del gasoil) y se congela a temperaturas más altas que el gasoil.

II.6. MATERIAS PRIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Las materias primas utilizadas para la obtención de biodiesel dependen del país y la región donde se produce [1,5,6,10]. En líneas generales, en Europa es muy común la utilización de colza, en Asia el aceite de palma y en los Estados Unidos de América y Argentina el aceite de soja. Otros aceites vegetales son también extensamente aprovechados, como el de maní, girasol, castor, etc., y algunos países utilizan grasa animal (sebo y aceite de pescado) para la producción de biodiesel.

REFERENCIAS

- [1] Knothe G, Krahl J, van Gerpen J. The Biodiesel Handbook. 2nd edition. AOCS Press, Urbana, 2011.
- [2] Shay EG. Diesel fuel from vegetable oils: Status and opportunities. Biomass and Bioenergy 1993;4(4):227-242.
- [3] Ma F, Hanna MA. Biodiesel production: a review. Bioresource Technology 1999;70:1-15.
- [4] Hossain AK, Davies PA. Plant oils as fuels for compression ignition engines: A technical review and life-cycle analysis. Renewable Energy 2010;35:1-13.
- [5] Romano SD, González Suárez E, Laborde MA. Combustibles alternativos. 2° ed. Buenos Aires: Ediciones Cooperativas, 2006.

- [6] Romano SD, Sorichetti PA. Dielectric relaxation spectroscopy in biodiesel production and characterization. 1st ed. Springer Verlag, Londres, 2011.
- [7] Corsini A, Marchegiani A, Rispoli F, Sciulli F, Venturini P. Vegetable oils as fuels in Diesel engine. Engine performance and emissions. *Energy Procedia* 2015;81:942-949.
- [8] Schwab AW, Bagby MO, Freedman B. Preparation and properties of diesel fuels from vegetable oils. Northern Regional Research Center, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1987.
- [9] Martínez G, Sánchez N, Encinar JM, González JF. Fuel properties of biodiesel from vegetable oils and oil mixtures. Influence of methyl esters distribution. *Biomass and bioenergy* 2014;63:22-32.

CAPÍTULO III: PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LÍQUIDOS

En este capítulo se introduce el estudio de propiedades eléctricas de materiales. En primer lugar se presentan las Ecuaciones de Maxwell en el vacío y en medios materiales, y luego se describen las propiedades eléctricas de líquidos dieléctricos, tales como el biodiesel, gasoil y aceites vegetales. Cabe aclarar que en toda esta tesis, salvo indicación contraria, se utilizará el Sistema Internacional de Unidades.

III.1. ECUACIONES DE MAXWELL EN EL VACÍO

Las Ecuaciones de Maxwell (Ecs. III.1 a III.4) [1,2,3] describen los fenómenos electromagnéticos en el vacío a través de campos vectoriales en función de la posición y del tiempo.

$$\nabla \cdot \bar{D}(x, t) = \rho(x, t) \quad (\text{III.1})$$

$$\nabla \cdot \bar{B}(x, t) = 0 \quad (\text{III.2})$$

$$\nabla \times \bar{H}(x, t) = \bar{J}(x, t) + \frac{d\bar{D}(x, t)}{dt} \quad (\text{III.3})$$

$$\nabla \times \bar{E}(x, t) = -\frac{d\bar{B}(x, t)}{dt} \quad (\text{III.4})$$

donde \bar{D} es el campo desplazamiento eléctrico y se mide en Cm^{-2} , ρ es la densidad de cargas libres medida en Cm^{-3} , \bar{B} es el campo inducción magnética y se mide en Tm^{-2} , \bar{H} es el campo magnético y se mide en Am^{-1} , \bar{J} es la densidad de corriente y se mide en $\text{Cs}^{-1}\text{m}^{-2}$ y \bar{E} es el campo eléctrico y se mide en Vm^{-1} .

Las fuerzas observables sobre las cargas quedan definidas por la llamada fuerza de Lorentz, según:

$$\bar{F}(x, t) = q[\bar{E}(x, t) + \bar{v} \times \bar{B}(x, t)] \quad (\text{III.5})$$

donde \bar{F} es la fuerza ejercida sobre la carga y se mide en N, q es el valor de la carga y se mide en C, y \bar{v} es la velocidad con la cual se desplaza la carga y se mide en ms^{-1} .

El campo eléctrico $\bar{E}(x, t)$ y desplazamiento $\bar{D}(x, t)$ están vinculados en el vacío según la Ec. III.6

$$\bar{D}(x, t) = \varepsilon_o \bar{E}(x, t) \quad (\text{III.6})$$

donde ε_o es una constante denominada permitividad del vacío y resulta igual a $\varepsilon_o = 8,854187 \times 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$.

Los campos inducción magnética $\bar{B}(x, t)$ y el campo magnético $\bar{H}(x, t)$ están vinculados en el vacío según la Ec. III.7

$$\bar{B}(x, t) = \mu_o \bar{H}(x, t) \quad (\text{III.7})$$

donde μ_o es una constante denominada permeabilidad del vacío y vale $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

Las constantes universales ε_o y μ_o están vinculadas con la velocidad de la luz, c , según:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o \mu_o}} \quad (\text{III.8})$$

En el Sistema Internacional de Unidades se define la velocidad de la luz en el vacío, c , como magnitud fundamental, siendo su valor $c = 299792458 \text{ ms}^{-1}$ exactamente.

III.2. ECUACIONES DE MAXWELL EN MEDIOS MATERIALES

Los materiales suelen clasificarse según la facilidad con la cual se desplazan las cargas a través de los mismos. Los conductores son sustancias cuyas cargas circulan fácilmente en su seno ante la aplicación de campos externos. Por el contrario, los dieléctricos son sustancias cuyas moléculas o átomos tienen electrones que se encuentran fuertemente ligados a los mismos [1]. Ante la aplicación de un campo eléctrico de intensidad moderada, los electrones no pueden circular libremente a través del material como

sucede en los conductores, sino que las cargas experimentan desplazamientos respecto de sus posiciones de equilibrio [1,2]. Si la intensidad del campo eléctrico supera un valor determinado, que depende de cada material, entonces los electrones no podrán permanecer sujetos a los átomos y el material se comportará como conductor [1,2,4,5]. Este efecto se denomina ruptura dieléctrica.

En ausencia de campos eléctricos externos, los baricentros de las distribuciones de las cargas de moléculas o átomos son coincidentes. Si se aplica un campo eléctrico a una molécula o átomo neutro, los baricentros de las distribuciones se desplazan [1]. El proceso de separación de los baricentros de las cargas produce un dipolo eléctrico, y entonces se dice que el material en cuestión se ha polarizado. El campo eléctrico así producido se superpone al campo eléctrico externo modificando el campo eléctrico total en las inmediaciones del dipolo. Normalmente se representa el dipolo eléctrico mediante un vector que apunta desde el baricentro de la distribución de carga negativa hacia el baricentro de la distribución de carga positiva multiplicado por el valor de la carga positiva (igual y opuesto al valor de la carga negativa) [1].

En la Figura 3.1 se esquematiza el efecto de la aplicación de un campo eléctrico a una molécula neutra sobre la distribución de cargas positivas y negativas. La separación entre los baricentros de las cargas positiva y negativa se representa por d y el vector dipolo eléctrico por \vec{p} .

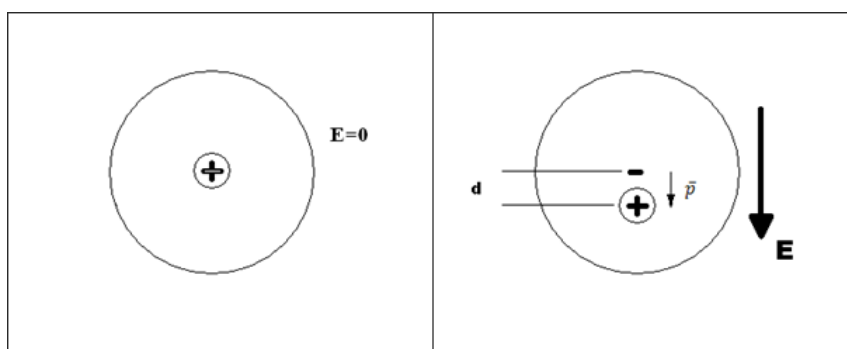


Figura 3.1 - Efecto de la aplicación de un campo eléctrico sobre la distribución de cargas positivas y negativas de un átomo.

Se observa en la Figura 3.1 que cuando el campo eléctrico es nulo (lado izquierdo), los baricentros de las distribuciones de cargas positivas y negativas coinciden. Cuando el

campo eléctrico externo es no nulo (lado derecho), la distribución de carga electrónica se desplaza ligeramente respecto al de las cargas positivas. En consecuencia, aparece un dipolo eléctrico que modifica el campo eléctrico total.

En un medio material, el efecto macroscópico de los dipolos inducidos en las moléculas por el campo externo modifica la relación entre los campos \bar{E} y \bar{D} respecto a la que se tenía en el vacío (Ec. III.6).

En sustancias isótropas tales como líquidos y para campos eléctricos externos de intensidad moderada (lejos de la ruptura dieléctrica), la separación entre cargas – y, entonces, el efecto de la polarización – puede aproximarse mediante una relación lineal entre los vectores campo eléctrico $\bar{E}(x, t)$, y desplazamiento $\bar{D}(x, t)$ [3] y está dada por la Ec. III.8

$$\bar{D}(x, t) = \varepsilon_o \varepsilon_r \bar{E}(x, t) \quad (\text{III.8})$$

donde ε_r se denomina permitividad relativa del material, y es un escalar adimensional.

El producto $\varepsilon_o \varepsilon_r$ se denomina permitividad del material, ε' , es un parámetro macroscópico que caracteriza la polarización del dieléctrico y se mide en $\frac{F}{m}$.

Se define el vector polarización \bar{P} a partir de la Ec. III.9

$$\bar{P}(x, t) = \bar{D}(x, t) - \varepsilon_o \bar{E}(x, t) \quad (\text{III.9})$$

Reemplazando el primer término del segundo miembro por la Ec. III.8 se obtiene

$$\bar{P}(x, t) = \varepsilon_o \varepsilon_r \bar{E}(x, t) - \varepsilon_o \bar{E}(x, t) \quad (\text{III.10})$$

y, sacando factor común $\varepsilon_o \bar{E}(x, t)$, queda

$$\bar{P}(x, t) = \varepsilon_o (\varepsilon_r - 1) \bar{E}(x, t) = (\varepsilon' - \varepsilon_o) \bar{E}(x, t) \quad (\text{III.11})$$

La Ec. III.11 es válida siempre y cuando la intensidad del campo externo sea moderada, como se considerará siempre en esta tesis. En ese caso, la separación entre cargas y,

entonces, el efecto de la polarización, pueden aproximarse mediante una relación lineal con el campo aplicado.

El vector \bar{P} puede interpretarse como la resultante de un conjunto de N elementos polarizables asociados a un momento dipolar medio de magnitud \bar{p} . De esta manera, puede establecerse una vinculación entre los parámetros macroscópicos y los microscópicos. El vector polarización total \bar{P} se expresa como se indica en la Ec. III.12,

$$\bar{P}(x, t) = N\bar{p} \quad (\text{III.12})$$

El momento dipolar, \bar{p} , resulta proporcional al campo eléctrico aplicado localmente en un entorno determinado de un dipolo molecular [1,4,5,6]. El campo local dependerá tanto del campo eléctrico externo como del campo inducido por las cargas de polarización. El efecto de la polarización resulta proporcional al campo local, de modo que el momento dipolar medio también debe serlo

$$\bar{p} = \alpha E_{local}(x, t) \quad (\text{III.13})$$

La constante α se denomina polarizabilidad y es un parámetro que indica la facilidad con la cual se inducen momentos dipolares en el material en estudio.

La relación entre los parámetros macroscópicos y los microscópicos queda determinada según la Ec. III.14, en la cual se relacionan las ecuaciones anteriores,

$$\bar{P}(x, t) = (\epsilon_r - 1)\epsilon_o \bar{E}_{externo}(x, t) = N\bar{p} = N\alpha E_{local}(x, t) \quad (\text{III.14})$$

Si en el medio, supuesto lineal e isótropo, existen portadores de carga libres, se tendrá además una densidad de corriente, \bar{J} , proporcional al campo eléctrico, \bar{E} ,

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (\text{III.15})$$

donde σ es la conductividad del medio y sus unidades son Sm^{-1} .

Además de la polarización debida al desplazamiento relativo de los baricentros de las distribuciones de las cargas electrónica y nuclear en moléculas simétricas, denominada

polarización electrónica, existen fenómenos de polarización originados en otros mecanismos [1,4,5,7], como se explica a continuación.

Cuando las moléculas con dipolos permanentes se exponen a campos eléctricos externos, las mismas experimentan un torque que tiende a alinear los dipolos con el campo externo, dando lugar a la denominada polarización por orientación. Las moléculas de agua son un típico ejemplo de moléculas polares. En la Figura 3.3 se esquematiza molécula sin dipolo permanente (lado izquierdo) y una molécula con dipolo permanente (lado derecho).

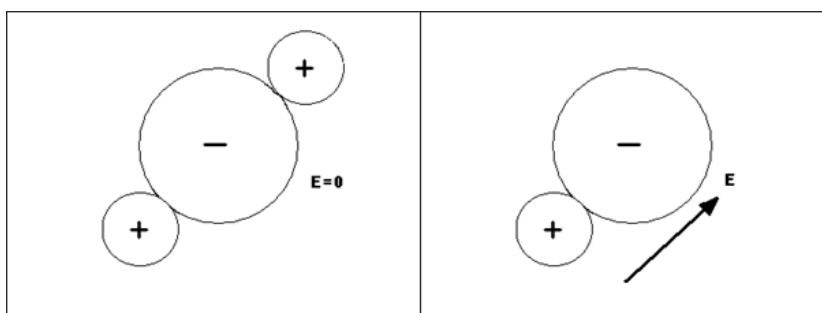


Figura 3.3 - Momento dipolar neto debido a la geometría de una molécula asimétrica.

Cabe señalar que este efecto se ve contrarrestado en parte por las colisiones intermoleculares (que aumentan con la temperatura). Por consiguiente, la polarización por orientación decrece con la temperatura [6].

En la Figura 3.4 se representa una sustancia formada por moléculas con dipolos permanentes en ausencia de un campo eléctrico externo (lado izquierdo) y también ante la presencia de un campo eléctrico externo (lado derecho). Cuando el campo eléctrico externo es nulo, el ordenamiento de los dipolos es aleatorio, lo cual se esquematiza mediante las flechas apuntando en todas las direcciones y da como resultado un vector polarización macroscópica, \bar{P} , igual a cero. En cambio, cuando el campo eléctrico externo es no nulo, el ordenamiento de los dipolos no es aleatorio, sino que los dipolos tienden a orientarse siguiendo la dirección del campo eléctrico externo, dando como resultado una polarización macroscópica, \bar{P} , no nula, lo cual se esquematiza mediante las flechas apuntando en la dirección del campo externo.

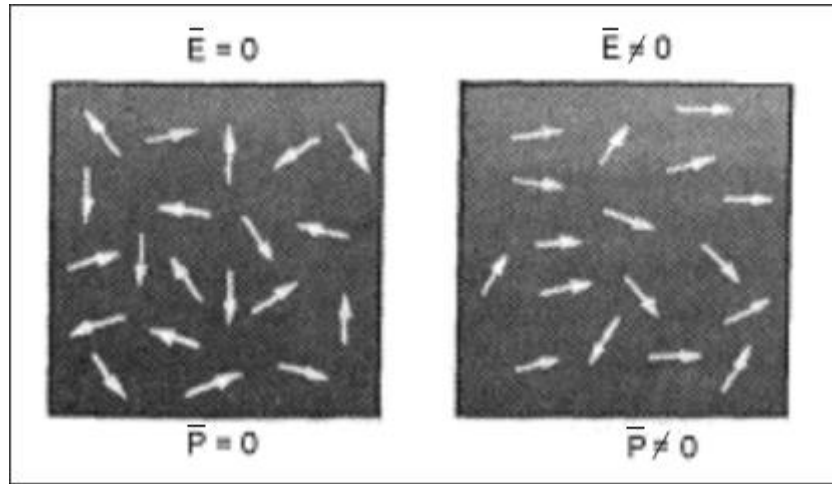


Figura 3.4 - Esquema de los efectos de un campo eléctrico externo sobre una sustancia con dipolos permanentes.

Existe otro mecanismo de polarización que se denomina polarización interfacial [4,5,6,7,8,9]. Se produce en la interfaz entre materiales con valores diferentes de permitividad y conductividad, o entre electrodos metálicos y dieléctricos con conductividad no despreciable [4,5,7,8]. En el caso de la polarización en la interfaz electrodo/dieléctrico, el bloqueo parcial del movimiento de cargas libres a nivel molecular en la interfaz entre el electrodo y la muestra, origina la separación de cargas positivas y negativas, dando lugar a una polarización adicional a la de la muestra. En consecuencia, la polarización interfacial depende de la geometría y estado de la superficie de los electrodos. El efecto de la misma es especialmente importante en las mediciones de permitividad a bajas frecuencias y en sustancias de conductividad alta [4,5,7,8,9]. Los efectos de la polarización de electrodos pueden reducirse mediante una selección adecuada del material y tratamientos de los mismos, y en general decrecen a frecuencias más elevadas [4,8].

En resumen, la polarización total observada macroscópicamente, \bar{P}_{total} , se debe a la superposición de los tres mecanismos mencionados y puede escribirse como la suma de las polarizaciones electrónica (\bar{P}_{elect}), de orientación (\bar{P}_{rot}) e interfacial (\bar{P}_{interf}) [1,4,5,6]

$$\bar{P}_{total} = \bar{P}_{elect} + \bar{P}_{rot} + \bar{P}_{interf} \quad (III.16)$$

III.3. CAMPOS ELÉCTRICOS ARMÓNICOS EN MEDIOS MATERIALES

Los campos armónicos en medios materiales son muy frecuentes en muchas aplicaciones tecnológicas. En particular, las mediciones llevadas a cabo en esta tesis se realizaron con campos armónicos, por lo que serán estudiados en detalle en esta sección. Cuando la amplitud del campo eléctrico externo aplicado a un dieléctrico varía en forma armónica, se observa en general que las fases relativas y la relación de amplitudes de los campos \bar{E} y \bar{D} dependen de la frecuencia; por esto es útil representar la permitividad a través de un número complejo [1,2]. Las ecuaciones anteriormente escritas en función de la posición y el tiempo, pueden reemplazarse por ecuaciones complejas, funciones del vector posición y de la frecuencia. Como todas las sustancias y mezclas estudiadas en esta tesis son macroscópicamente homogéneas e isotrópicas, solo se observaron variaciones de la permitividad con la frecuencia y no con la posición.

En esas condiciones, la permitividad compleja $\varepsilon(\omega)$ está dada por

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega) = \varepsilon_o[\varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega)] = \varepsilon_o\varepsilon_r(\omega) \quad (\text{III.17})$$

donde j es la unidad imaginaria. La parte real de la Ec. III.17 describe los procesos de acumulación de energía mientras que los procesos de disipación de energía están asociados a la parte imaginaria [2,4,5,7].

La relación entre los campos \bar{E} y \bar{D} dada por la Ec. III.8 puede generalizarse para el caso en el que el dieléctrico en estudio tiene pérdidas. Reemplazando en la Ec. III.8 la expresión de la permitividad dada por la Ec. III.17, se obtiene

$$D(\omega) = \varepsilon_r(\omega)E(\omega) = [\varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega)]E(\omega) \quad (\text{III.18})$$

En la Ec. III.18 se observa que el campo $\bar{D}(\omega)$ tiene una componente en fase con $\bar{E}(\omega)$ y una componente en cuadratura con $\bar{E}(\omega)$. Como se mostrará más adelante, la componente en fase representa la acumulación de energía mientras que la componente en cuadratura representa las pérdidas dieléctricas.

Se verifica experimentalmente que la parte real de la permitividad compleja $\varepsilon(\omega)$ de un dieléctrico decrece con la frecuencia [4,5,6,7,10]. Como cada uno de los mecanismos de polarización tiene tiempos característicos de órdenes de magnitud muy distintos, el

efecto de los distintos mecanismos de polarización antes descriptos será más o menos significativo dependiendo de la frecuencia [4,5,7]. Por ejemplo, para campos de frecuencia suficientemente alta, los dipolos permanentes no pueden “seguir” las oscilaciones del campo, y entonces no se observan efectos por orientación de dipolos. La única contribución presente en este caso será el de la polarización electrónica. A frecuencias menores comienzan a observarse los efectos de la polarización por orientación.

En la Figura 3.5 se muestra el espectro típico de las partes real e imaginaria de la permitividad en función de la frecuencia y los principales mecanismos de polarización presentes en cada rango de frecuencias de un dieléctrico sin cargas libres. Las sustancias muy purificadas estudiadas en este trabajo (gasoil, biodiesel industrial y aceite de soja utilizado para producirlo) tienen espectros como el de la Figura 3.5. En la misma se indica el rango de frecuencias utilizado en esta tesis.

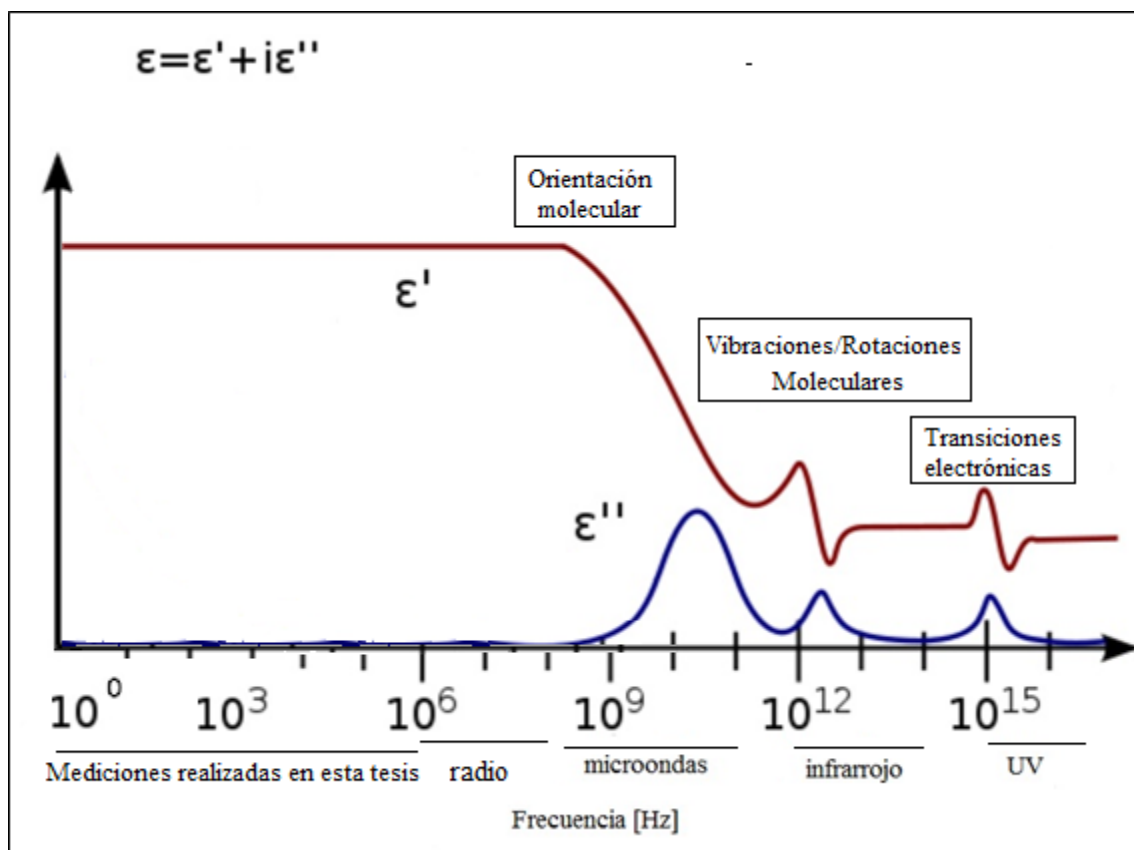


Figura 3.5 - Espectro dieléctrico típico para un dieléctrico sin portadores de carga libre.

Si la sustancia en estudio no está suficientemente purificada, la presencia de sustancias contaminantes puede llevar a que la conductividad, σ [S/m], sea no nula. En ese caso la parte imaginaria de la permitividad, $\varepsilon_r''(\omega)$, tiene un término que describe la conductividad, sumado al de las pérdidas por polarización. El término de conductividad es inversamente proporcional a ω para las frecuencias bajas y es despreciable a frecuencias a partir de aproximadamente 1kHz, para las sustancias estudiadas en esta tesis.

Respecto al término de pérdidas por polarización, tanto para sustancias conductivas como no conductivas, al limitar las frecuencias de excitación hasta 2MHz, el primer pico de relajación dipolar queda muy alejado de la máxima frecuencia medida. Por ese motivo, el término de disipación por polarización de orientación resulta despreciable; este fue el caso de todas las sustancias estudiadas en esta tesis.

En resumen, para todas las muestras estudiadas en esta tesis, se considera que la dependencia de la permitividad compleja con la frecuencia (a temperatura constante) está dada por la Ec. III.19

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon' - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (\text{III.19})$$

En la práctica, se expresan los resultados en términos de la permitividad compleja relativa, $\varepsilon_r(\omega)$,

$$\varepsilon_r(\omega) = \frac{\varepsilon(\omega)}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r' - j \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \quad (\text{III.20})$$

Los dieléctricos con conductividad no nula presentan espectros como el que se muestra en la Figura 3.6 [5]

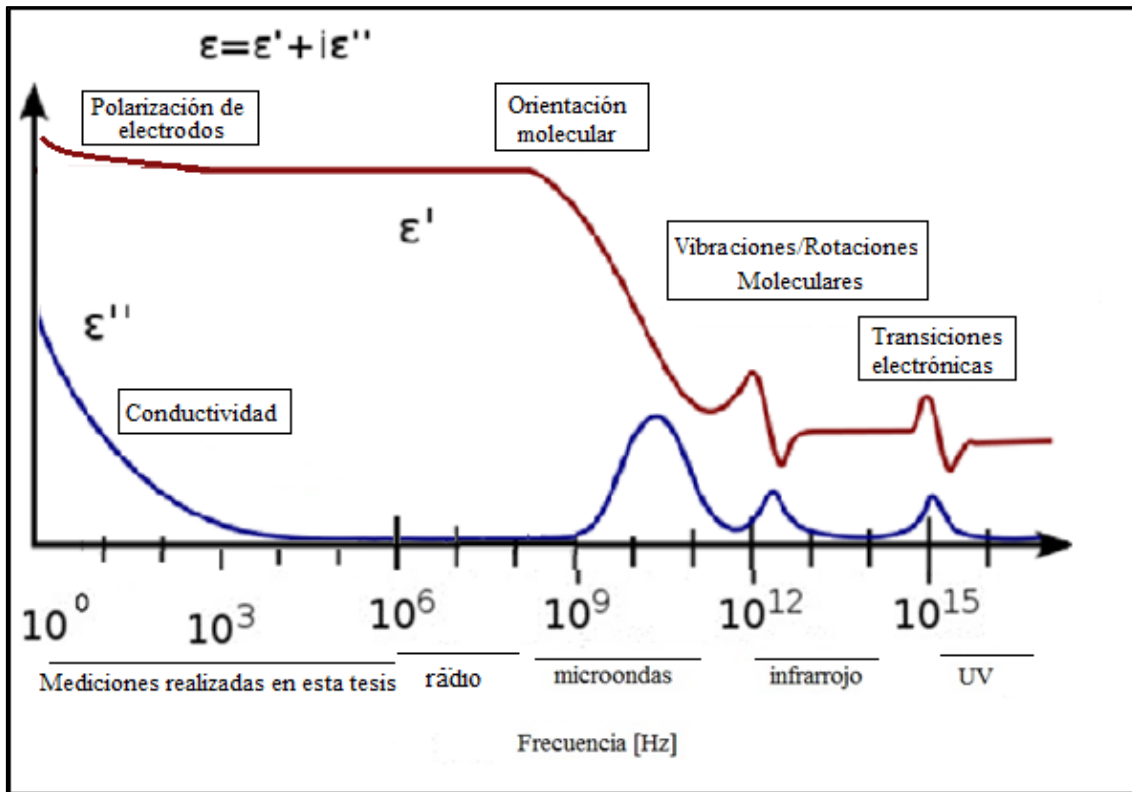


Figura 3.6 - Espectro dieléctrico de una sustancia conductiva.

En la Figura 3.6 se observa, en la parte imaginaria de la permitividad, una “cola” conductiva en la región de frecuencias bajas.

Cabe destacar que para todo el rango de frecuencia estudiado en esta tesis, las dimensiones características de los sistemas de medición son mucho menores que la longitud de onda a la frecuencia más alta de excitación. En consecuencia, la aproximación circuital está plenamente justificada. Por consiguiente, para analizar la relación entre las variables eléctricas mensurables (corrientes y tensiones) con las partes real e imaginaria de la permitividad, se estudiará el caso de un capacitor ideal de placas paralelas. Si Q es la carga del capacitor y V la tensión a la cual está sometido, entonces vale la siguiente relación

$$Q = C_o V \quad (\text{III.21})$$

donde $C_o = \epsilon_o \frac{A}{d}$ es la capacitancia del capacitor ideal (sin pérdidas ni efectos de borde) vacío de placas paralelas de área A y separadas una distancia d .

La relación entre la corriente del capacitor I_c y la carga del capacitor es Q está dada por

$$I_c = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{III.22})$$

Entonces, al suponer que la excitación es sinusoidal, la Ec. III.22 puede escribirse como

$$I_c = \frac{dQ}{dt} = C_o \frac{dV}{dt} = C_o j\omega V \quad (\text{III.23})$$

En la Ec. III.23 se observa que la corriente del capacitor, I_c , está atrasada 90° respecto a la tensión, V . Al haber una diferencia de fase de 90° , entre la corriente y la tensión, no hay disipación de energía. En este caso, los vectores \bar{E} y \bar{D} están en fase, ya que la relación que los vincula es la dada por la Ec. III.18, con $\varepsilon_r = 1$.

Si el capacitor se llena con un líquido con permitividad relativa compleja $\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon'_r(\omega) - j\varepsilon''_r(\omega)$, entonces la capacitancia será $C(\omega) = [\varepsilon'_r(\omega) - j\varepsilon''_r(\omega)]C_o$.

La relación entre la tensión V y la corriente I_c es ahora

$$I_c = C(\omega)j\omega V = C_o V [\omega\varepsilon''_r(\omega) + j\omega\varepsilon'_r(\omega)] \quad (\text{III.24})$$

En la Ec. III.24 hay una componente de la corriente en fase con la tensión y una componente de la corriente adelantada 90° .

Si la sustancia en análisis tiene además portadores de carga libres, entonces se incluye un término de conducción, I_{cond} , en fase con la tensión de excitación V ,

$$I_{cond} = \sigma \frac{A}{d} V \quad (\text{III.25})$$

La corriente total, I_{total} , es la suma de las corrientes I_c e I_{cond} ,

$$I_{total} = C_o V [\omega\varepsilon''_r(\omega) + j\omega\varepsilon'_r(\omega)] + \sigma \frac{A}{d} V = C_o V \left[\omega\varepsilon''_r(\omega) + \frac{\sigma}{\varepsilon_o} + j\omega\varepsilon'_r(\omega) \right] \quad (\text{III.26})$$

Como antes, se puede observar en la Ec. III.26 que I_{total} tiene un término que está en fase con la tensión V , que está asociada a la disipación de energía, y un término que está en cuadratura con V , que describe la acumulación de energía en el dieléctrico.

Las sustancias estudiadas en esta tesis no presentan efectos de relajación de la polarización en los rangos de frecuencias estudiados. Luego, ε_r' es prácticamente independiente de ω , y ε_r'' involucra solamente efectos de disipación de energía asociados al transporte de cargas, por lo que es directamente proporcional a la conductividad e inversamente proporcional a la frecuencia.

En cuanto a la permitividad, se observa experimentalmente que su valor decrece con la temperatura. En general esto se debe a dos efectos: por un lado, la dilatación del fluido tiende a disminuir el número de dipolos por unidad de volumen y, por otro lado, la polarización molecular disminuye debido al aumento de las colisiones al azar de los dipolos. En resumen, en los líquidos y rangos estudiados en este trabajo, la parte real de la permitividad depende linealmente de la temperatura

$$\varepsilon_r'(T) = \varepsilon_r'(T_o) + d\varepsilon_r'/dT(T - T_o) \quad (III.27)$$

donde T es la temperatura absoluta de la muestra, $\varepsilon_r'(T_o)$ es la permitividad relativa de la muestra a la temperatura de referencia $T_o = 318K$ y $d\varepsilon_r'/dT$ es el coeficiente de temperatura de la permitividad relativa, calculado a la temperatura de referencia, T_o , y expresado en K^{-1} y para las muestras estudiadas en esta tesis es negativo.

Por otro lado, en las sustancias estudiadas en este trabajo, se observa que la conductividad es baja a temperatura ambiente pero aumenta rápidamente con la temperatura. Esta dependencia puede ajustarse mediante una ley de Arrhenius [7,10],

$$\sigma(T) = \sigma_o \exp(-E/kT) \quad (III.28)$$

donde E es la energía de activación de la conductividad en J, σ_o es el factor pre-exponencial (en S/m) y k es la constante de Boltzmann ($1.3806503 \times 10^{-23} J K^{-1}$).

REFERENCIAS

- [1] von Hippel, AR. Dielectrics and waves. John Wiley & Sons, New York, 1954.
- [2] Kremer F, Schonhals A. Broadband dielectric spectroscopy. 1st ed. Berlin, Springer-Verlag, Heidelberg, 2003.
- [3] Jackson JD. Classical Electrodynamics. 3rd Ed. John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, 1999.
- [4] Sorichetti PA, Matteo CL. Low-frequency dielectric measurement of complex fluids using high-frequency coaxial sample cells. *Measurement* 2007;40(4):437-449.
- [5] Sorichetti PA. Técnicas dieléctricas en el estudio de transiciones de fase de fluidos complejos. Tesis de doctorado, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, 2012.
- [6] Lambri OA, Matteo CL, Mocellini RR, Sorichetti PA, Zelada GI. Propiedades viscoelásticas y eléctricas de sólidos y líquidos. Una introducción a la electro-reología con sus aplicaciones tecnológicas. UNR Editora, Rosario, 2007.
- [7] Romano SD, Sorichetti PA. Dielectric relaxation spectroscopy in biodiesel production and characterization. 1^o ed. Springer Verlag, Londres, 2011.
- [8] Tirado MC. Comportamiento dieléctrico de suspensiones electrolíticas. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Tucumán, 2002.
- [9] Schawn HP. Electrode polarization impedance and measurements in biological materials. *Annals of the New York Academy of Sciences*. Bioelectrodes 1968;148:191-209.

[10] Gonzalez Prieto LE, Sorichetti PA, Romano SD. Electric properties of biodiesel in the range from 20 Hz to 20 MHz. Comparison with diesel fossil fuel. *International Journal of Hydrogen Energy* 2008;33:3531-3537.

CAPÍTULO IV: ESPECTROSCOPIA DIELECTRICA

En este capítulo se mencionan las generalidades de la espectroscopia dieléctrica y se describen los sistemas de medición de propiedades eléctricas utilizados en esta tesis.

IV.1. GENERALIDADES

La espectroscopia dieléctrica permite estudiar la respuesta de una sustancia cuando la misma es excitada con un campo eléctrico externo [1,2,3,4,5,6]. Para esto, se introduce una muestra de la sustancia en estudio dentro de una celda portamuestras en la cual tiene lugar la interacción entre la sustancia y el campo eléctrico externo. La celda portamuestras se encuentra conectada eléctricamente a una interfaz de medición y a un generador de señales, y a menudo a un sistema de captura de datos. Como las propiedades eléctricas son fuertemente dependientes de la temperatura [3,4,5,6], la celda portamuestras debe encontrarse termostatzada. En la Figura IV.1 se muestra un esquema de un sistema de medición de propiedades eléctricas.

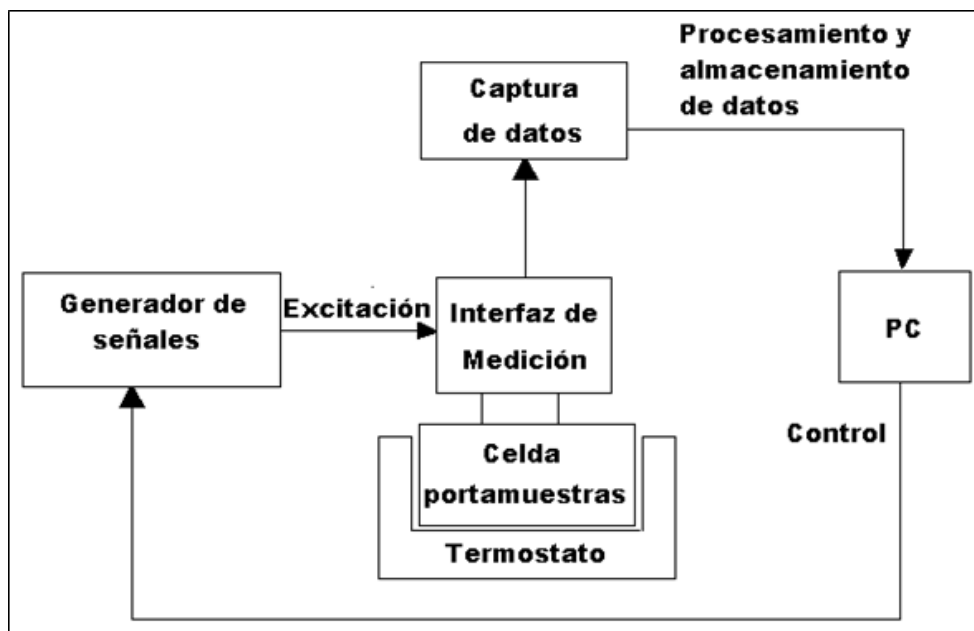


Figura IV.1 - Esquema de un sistema de medición de propiedades eléctricas.

La termostatación de la muestra puede llevarse a cabo de varias formas, por ejemplo con una celda de pared doble entre la cual circula agua a temperatura controlada, con una celda cerrada parcialmente sumergida en un baño térmico, etc.

Dependiendo del rango de frecuencias de medición se utilizan distintas técnicas, celdas de medición y configuraciones experimentales [1,2,3,4,5,6]. El criterio de selección de la técnica a utilizar consiste en comparar la mínima longitud de onda del campo eléctrico (λ_{min}) con la máxima dimensión del sistema de medición (D). Si se verifica que $D \gg \lambda_{min}$ entonces es válido aplicar la aproximación cuasi estática (descripción circuital) y la celda portamuestras puede modelarse como un elemento de parámetros concentrados. En caso contrario, es necesario utilizar la teoría de campos electromagnéticos para describir adecuadamente el sistema [1,2,3,4,5,6].

En todo el rango de frecuencia estudiado en esta tesis se cumple $D \gg \lambda_{min}$, por lo que se ahondará en la descripción de las técnicas de medición en ese rango de frecuencias.

IV.2. DESCRIPCIÓN CUASI ESTÁTICA

Como se indicó en el apartado anterior, cuando se cumple la condición cuasi estática, la celda puede modelarse a través de un capacitor, es decir, como un elemento circuital. En este caso, la medición de las propiedades eléctricas se lleva a cabo comparando la capacitancia de un capacitor vacío (sin muestra) y lleno (con muestra).

La capacitancia del capacitor vacío, C_o , vale

$$C_o = K \epsilon_o \quad (IV.1)$$

donde K depende de la geometría, tiene dimensiones de longitud y se denomina “constante de celda”, y ϵ_o es la permitividad del vacío (8.85417 pFm^{-1}). La determinación de la constante de celda se realiza experimentalmente y se detalla en la sección IV.4.

Cuando la celda está excitada por un campo eléctrico de frecuencia ω , tiene asociada una admitancia $Y_o(\omega) = j\omega C_o$. Esto supone que los efectos inductivos y las pérdidas son despreciables, es decir, que el elemento se comporta como un capacitor ideal.

Al introducir una sustancia en la celda portamuestras, la admitancia medida será, en general, un número complejo $Y(\omega) = j\omega C(\omega)$, donde la parte real de $Y(\omega)$ está asociada a

las pérdidas eléctricas de la sustancia y la parte imaginaria representa los efectos de polarización dieléctrica:

$$Y(\omega) = G(\omega) + jB(\omega) = j\omega C(\omega) \quad (\text{IV.2})$$

donde G se denomina conductancia y B susceptancia.

A partir la Ec. IV. 2 puede verse que queda definida una capacitancia compleja

$$C(\omega) = C'(\omega) - j C''(\omega) \quad (\text{IV.3})$$

El signo negativo en la parte imaginaria de $C(\omega)$ lleva a valores no negativos de G , lo cual es conveniente porque G describe los procesos de disipación de energía.

Igualando las partes reales e imaginarias de las Ecs. IV.2 y IV.3 puede verse que

$$G(\omega) = \omega C''(\omega) \quad (\text{IV.4})$$

y

$$B(\omega) = \omega C'(\omega) \quad (\text{IV.5})$$

La permitividad relativa compleja de la sustancia en estudio $\varepsilon_r(\omega)$ es

$$\varepsilon_r(\omega) = \frac{C(\omega)}{C_o} = \varepsilon'_r(\omega) - i\varepsilon''_r(\omega) \quad (\text{IV.6})$$

Para mediciones en líquidos es conveniente medir la diferencia de capacitancia, ΔC , entre la celda cargada con la muestra, $C(\omega)$ y la celda vacía, C_o :

$$\Delta C(\omega) = C(\omega) - C_o \quad (\text{IV.7})$$

de donde la permitividad del líquido se obtiene como

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 + \frac{\Delta C(\omega)}{C_o} \quad (\text{IV.8})$$

La Ec. IV.8 se utilizó en este trabajo para obtener la permitividad relativa a partir del incremento en la capacitancia de la celda portamuestras al llenar la misma con la muestra en estudio.

IV.3. CELDA DE MEDICIÓN

La celda de medición consta de un recipiente portamuestras en el cual se introduce el capacitor de medición y el dieléctrico en estudio [1,3,4,5]. Si bien en ciertos casos (líquidos de baja presión de vapor) pueden utilizarse recipientes abiertos, el uso de recipientes herméticos es recomendable para evitar la contaminación y la evaporación de las muestras.

Los electrodos de medición en general son de geometrías simples, tales como plano paralelos, coaxiales o interdigitados. En esta tesis se utilizaron electrodos de configuración plano-paralelos y coaxial.

Las celdas de medición deben satisfacer varios requerimientos: la capacitancia en vacío, C_o , debe ser independiente de la frecuencia dentro del rango de trabajo, los materiales utilizados para su construcción deben tener muy bajas pérdidas dieléctricas, deben ser dimensionalmente estables, el valor de C_o no debe modificarse con el paso del tiempo ni debido a los ciclos térmicos, no deben reaccionar químicamente con las muestras, deben poder limpiarse fácilmente y tener un costo razonable.

En el caso de los electrodos plano-paralelos utilizados en esta tesis, el material de los mismos es platino platinizado. La platinización de los electrodos se llevó a cabo utilizando el procedimiento descrito en [7], el cual se encuentra en el Anexo 1. A fin de mantener constante la separación entre electrodos, los mismos se encuentran sujetos a un bulbo de vidrio y espaciados entre sí con separadores de vidrio con forma de gota. El vidrio utilizado tiene un coeficiente de dilatación muy bajo de modo de asegurar la estabilidad dimensional. El material del recipiente portamuestras también es vidrio. En la Figura IV.2 se muestra una fotografía de la celda de medición ensamblada.



Figura IV.2 - Fotografía de la celda de medición con electrodos de platino platinizado.

Durante el transcurso de esta tesis, se diseñó y se construyó una celda con electrodos cilíndricos coaxiales. Tanto los electrodos como el recipiente fueron construidos con acero inoxidable, a fin de que la celda sea utilizable en ambientes industriales. Esta celda de medición se describirá en más detalle en el capítulo VII.

IV.4. CALIBRACIÓN DE LA CELDA DE MEDICIÓN

La calibración de la celda de medición permite obtener el valor de la capacitancia en vacío de la misma, C_0 . La importancia de este procedimiento es fundamental, ya que el valor de la capacitancia en vacío afecta los valores de permitividad, como puede verse en la Ec. IV.10.

Para llevar a cabo la calibración de la celda se utilizan líquidos de referencia [1,3,4,5,6,8]. Estos líquidos son sustancias que cumplen con las siguientes condiciones [3,6,7,8]:

- su permitividad está determinada con gran exactitud y es prácticamente constante en el rango de frecuencias de interés,
- no presentan pérdidas dieléctricas en el rango de frecuencia de interés,
- son sustancias de alta pureza y las impurezas residuales que pueden presentar no afectan el valor de la permitividad.

En primer lugar se termostatiza la celda de medición y se la conecta a un instrumento medidor de impedancia. La capacitancia medida es la suma de la capacitancia de la celda y de los cables de conexión, es decir

$$C_v = C_{cable} + C_o \quad (IV.9)$$

donde C_v es la capacitancia total medida, C_{cable} es la capacitancia de los cables de conexión y C_o es la capacitancia de la celda vacía.

Luego se introduce un líquido de referencia en la celda de medición de modo tal que los electrodos queden completamente sumergidos en el líquido. La capacitancia total medida, C_{llena} , es:

$$C_{llena} = C_{cable} + \epsilon_r C_o \quad (IV.10)$$

donde C_{llena} es la capacitancia total medida y $\epsilon_r C_o$ es la capacitancia de la celda de medición llena con el dieléctrico de permitividad ϵ_r .

La diferencia de las capacitancias medidas, ΔC , es

$$\Delta C = C_{llena} - C_v = C_o(\epsilon_r - 1) \quad (IV.11)$$

Como ΔC puede medirse y ϵ_r es conocido (por tratarse de la permitividad de un líquido de referencia), puede hallarse la capacitancia en vacío de la celda según:

$$C_o = \frac{\Delta C}{(\epsilon_r - 1)} \quad (IV.12)$$

El procedimiento anterior debe llevarse a cabo a temperatura cuidadosamente controlada, dado que la permitividad varía con la temperatura.

La calibración de todas las celdas de medición utilizadas en esta tesis se llevó a cabo con ciclohexano como líquido de referencia, a temperaturas entre 298K y 303K (+/- 0.1K) y a frecuencias entre 1kHz y 100kHz.

Los datos experimentales de las calibraciones se encuentran en el Anexo 2.

El valor de la capacitancia en vacío de la celda con electrodos de platino es $(0.862 \pm 0.003)pF$, y el de la celda de acero es $(19.59 \pm 0.03)pF$. En ambos casos la diferencia entre los valores de capacitancia a cada frecuencia es menor que el error experimental.

IV.5. ESQUEMA EXPERIMENTAL

En la Figura IV.3 se muestra un esquema del arreglo experimental para la medición de propiedades eléctricas utilizado en esta tesis. La conexión entre la celda de medición y la interfaz de medición se hace a través de un cable coaxil. La celda de medición se encuentra parcialmente sumergida en el baño térmico, y sujeta mediante un soporte metálico. En cuanto al baño térmico, consistió en un recipiente plástico de 5 litros lleno con agua destilada. El control de temperatura se llevó a cabo con un cabezal termostático marca Lauda con una potencia de 1.6kW con temperatura ajustable en forma digital con pasos de 0.1K. El termostato fue calibrado utilizando como referencia un termómetro de resistencia de platino y unidad de lectura marca Fluke, con resolución de 10^{-3} K. Durante la calibración se verificó que el termostato Lauda estabiliza la temperatura dentro de la centésima de K. En el Anexo 3 se dan los detalles de la calibración del termostato, y en el Anexo 4 las especificaciones del termómetro de precisión (Fluke).

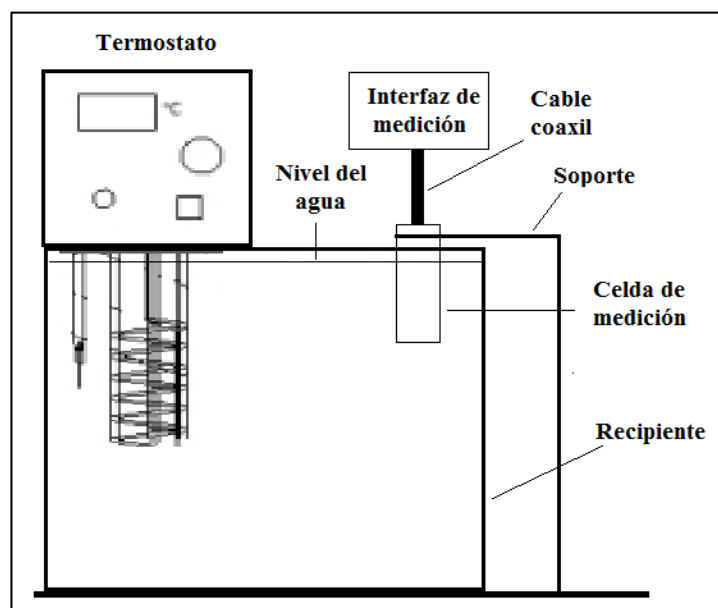


Figura IV.3 - Arreglo experimental para la medición de propiedades eléctricas.

A continuación se describen los equipos utilizados en cada configuración.

IV.5.1. Equipamiento para mediciones entre 20Hz y 2MHz

En esta configuración se utilizó un generador de señales marca Instek modelo GW-830 de síntesis digital directa (DDS), un osciloscopio digitalizador marca Tektronik TDS-210 de dos canales de muestreo simultáneo con una tasa de digitalización de 10^9 muestras por segundo (1GSample/s) y ancho de banda analógico de 60MHz, y una interfaz de medición diseñada y construida por el Dr. Ing. Sorichetti en el marco de su tesis de doctorado [6], también descripta en [4]. El control del sistema es llevado a cabo a través de una computadora personal de escritorio mediante un software marca Agilent. En el Anexo 4 se encuentran las especificaciones de los equipos utilizados.

Esta configuración fue utilizada para realizar las mediciones de aceites vegetales comerciales y biodiesel obtenido a partir del mismo [9,10,11]. Estas mediciones se llevaron a cabo con una celda de medición con electrodos plano paralelos de platino platinizado.

El rango de frecuencias de medición de la configuración A va de 20Hz hasta 2MHz. Se efectúa un barrido logarítmico a 10 frecuencias por década, resultando 51 frecuencias de medición. El resultado correspondiente a cada frecuencia es el promedio de 5 repeticiones a la misma frecuencia de medición. En esas condiciones, el sistema descripto demanda un tiempo de aproximadamente 30 minutos para cada barrido.

IV.5.2. Equipamiento para mediciones entre 1kHz y 100kHz

En este rango se efectuaron mediciones a las frecuencias de 1kHz, 10kHz y 100kHz. Se utilizó un medidor de impedancia marca Tonghui modelo TH2822C. El mismo es portátil, combina en un solo equipo las funciones de generación de señales, captura de datos e interfaz de medición y puede ser controlado mediante una computadora portátil a través de una interfaz USB. En esta tesis se utilizó un software de control Agilent. Tanto el medidor de impedancia como la computadora portátil se alimentan con baterías, a fin de aislar la red eléctrica del sistema de medición. En el Anexo 4 se encuentran las especificaciones de los equipos utilizados.

Esta configuración fue utilizada para realizar las mediciones de biodiesel y gasoil industriales y sus mezclas [12,13], y para las mediciones de biodiesel y aceite de soja y sus mezclas. En el caso del sistema biodiesel/gasoil se utilizó la celda de medición con

electrodos plano paralelos de platino platinizado, mientras que en el caso del sistema biodiesel/aceite de soja se utilizó la celda con electrodos coaxiales de acero inoxidable, diseñada y construida en el marco de esta tesis y descripta en el capítulo VII.

El resultado a cada frecuencia de medición se obtiene del promedio de 30 repeticiones. Cada serie de mediciones demanda menos de 5 minutos.

IV.6. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

En primer lugar se termostatiza la celda de medición vacía. El baño térmico se encuentra a la temperatura de medición más baja del rango de temperaturas a medir, la cual debe ser al menos 5K superior a la temperatura ambiente, a fin de que el cabezal termostático pueda controlarla adecuadamente.

A continuación se realizan tres mediciones sucesivas, a fin de verificar que los valores de cada elemento sean los correctos: la primera medición se efectúa sin conectar elementos a la interfaz; en la segunda se conecta el cable coaxil (quedando en su extremo libre), y en la tercera se conecta la celda de medición (vacía) al extremo libre del cable coaxil. Estas mediciones permiten verificar que la interfaz, el cable y la celda se encuentren en condiciones adecuadas para llevar a cabo las mediciones.

Una vez verificado el sistema de medición, se introduce el líquido dieléctrico en estudio en la celda de medición, sin modificar la posición de ninguno de los elementos del sistema. La carga del líquido se realiza con una pipeta automática, a fin de asegurar que siempre se introduzca la misma cantidad. El volumen utilizado es de 50ml para la celda de vidrio y de 32ml para la celda de acero. Estos volúmenes se fijan de modo tal que los electrodos queden completamente sumergidos en el líquido en estudio.

Una vez introducido el dieléctrico, se deja que el mismo alcance el equilibrio térmico con el baño termostático [5,6] y entonces se efectúa la medición correspondiente a la primera temperatura. Finalizadas las series de mediciones correspondientes a la primera temperatura de medición, se ajusta el termostato a la segunda temperatura deseada y, una vez alcanzado nuevamente el equilibrio térmico, se efectúan las series de mediciones correspondientes. El procedimiento se repite a cada temperatura de interés, en orden creciente. Se verifica experimentalmente que, con el instrumental, las celdas y las sustancias utilizadas, un lapso de 30 minutos es suficiente para la estabilización térmica. Una forma práctica de verificar que el dieléctrico ha alcanzado el equilibrio

térmico, es comprobar que la lectura de la capacitancia eléctrica indicada por el medidor de impedancia, a una frecuencia dada, es estable. En esta tesis se utilizó como frecuencia de referencia 100kHz.

Una vez finalizadas las mediciones, se desarma el sistema de medición y debe limpiarse cada parte del mismo, y en particular la celda de medición. Los reactivos utilizados para limpieza de los electrodos de la celda dependen de la sustancia estudiada. En el caso de biodiesel y aceites vegetales, se introducen los electrodos de la celda sucesivamente en alcohol etílico, acetona y alcohol isopropílico. En el caso de gasoil o mezclas biodiesel/gasoil ricas en gasoil, en primer lugar se utiliza biodiesel para arrastrar el gasoil, y luego alcohol etílico, acetona y alcohol isopropílico, en ese orden. Los conectores de los cables y de los equipos se limpian con alcohol isopropílico. Los recipientes de las celdas de medición se limpian con escobilla, utilizando agua y detergente. Finalmente, se enjuagan los recipientes con agua desionizada.

REFERENCIAS

[1] von Hippel, AR. Dielectrics and waves. John Wiley & Sons, New York, 1954.

[2] Kremer F, Schonhals A. Broadband dielectric spectroscopy. 1st ed. Berlin, Springer-Verlag, Heidelberg, 2003.

[3] Lambri OA, Matteo CL, Mocellini RR, Sorichetti PA, Zelada GI. Propiedades viscoelásticas y eléctricas de sólidos y líquidos. Una introducción a la electro-reología con sus aplicaciones tecnológicas. UNR Editora, Rosario, 2007.

[4] Sorichetti PA, Matteo CL. Low-frequency dielectric measurement of complex fluids using high-frequency coaxial sample cells. *Measurement* 2007;40(4):437-449.

[5] Romano SD, Sorichetti PA. Dielectric relaxation spectroscopy in biodiesel production and characterization. 1st ed. Springer Verlag, Londres, 2011.

[6] Sorichetti PA. Técnicas dieléctricas en el estudio de transiciones de fase de fluidos complejos. Tesis de Doctorado, 2012.

- [7] Tirado MC. Comportamiento dieléctrico de suspensiones electrolíticas. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Tucumán, 2002.
- [8] Gregory AP, Clarke RN. Traceable measurements of the static permittivity of dielectric reference liquids over the temperature range 5–50°C. *Measurement science and technology* 2005;16:1506-1516.
- [9] Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Electrical properties of vegetable oils between 20 Hz and 2 MHz. *Int J Hydrogen Energy* 2014;39:8754–8758.
- [10] Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Electrical and ultrasonic properties of vegetable oils and biodiesel. *Fuel* 2015;139:466-471.
- [11] Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Permittivity of biodiesel-rich blends with fossil diesel fuel: Application to biodiesel content estimation. *Fuel* 2016;177:268-273.
- [12] Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Permittivity of diesel fossil fuel and blends with biodiesel in the full range from 0% to 100%: Application to biodiesel content estimation. *Fuel* 2017;188:367-373.
- [13] Corach J, Colman M, Sorichetti PA, Romano SD. Kinematic viscosity of soybean biodiesel and diesel fossil fuel blends: Estimation from permittivity and temperature. *Fuel* 2017;207:488-492.

CAPÍTULO V: RESULTADOS EXPERIMENTALES

En las secciones de este capítulo se presentan los resultados experimentales de las muestras estudiadas de aceites vegetales, biodiesel, gasoil y sus mezclas. En cada sección se mencionan los materiales y métodos empleados. Estos resultados son la base para el análisis, los modelos y las correlaciones que se presentan en el capítulo VI.

Los valores de permitividad compleja de todas las muestras se obtuvieron aplicando la Ec. IV.8, a la diferencia entre los valores medidos, con y sin muestra, de la capacitancia de la celda, $\Delta C(\omega)$, (Ec. IV.7). Los valores experimentales de $\Delta C(\omega)$ de todas las muestras estudiadas se encuentran en el Anexo 5. Los parámetros de ajuste de la permitividad relativa compleja se obtuvieron ajustando los resultados al modelo de la Ec. III.20, según se explica en el Anexo 6.

A modo de ejemplo, en la Figura V.1.1 se muestran los valores experimentales de $\Delta C(\omega)$ (parte real e imaginaria), para la celda de la Figura IV.2, cargada con aceite de uva a 300K, medida entre 20Hz y 2MHz.

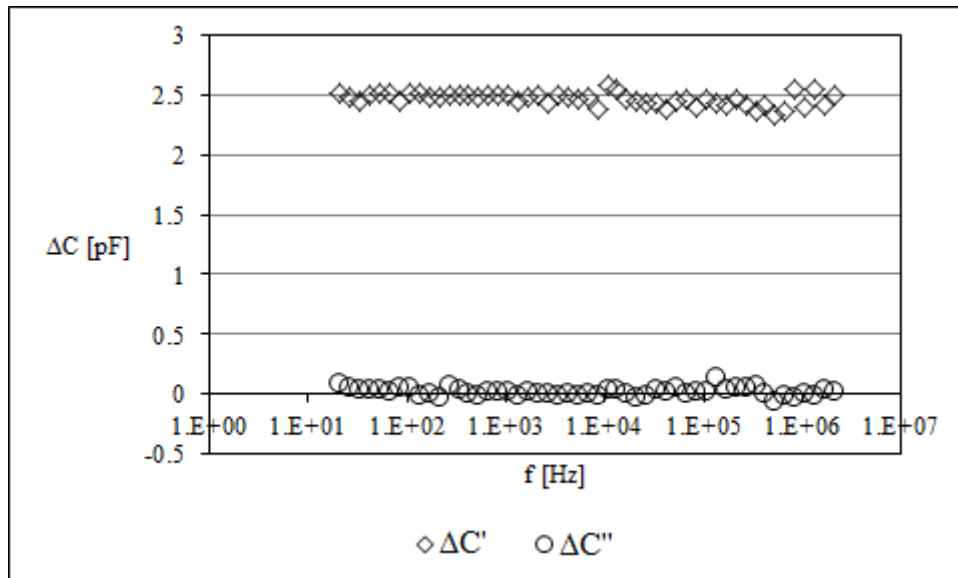


Figura V.1.1 - Parte real e imaginaria de $\Delta C(\omega)$ del aceite de uva a 300K.

En la Figura V.1.1 se observa que la parte real de $\Delta C(\omega)$ es prácticamente constante en todo el rango de frecuencia estudiado, mientras que la parte imaginaria tiene un valor muy bajo. Todas las muestras estudiadas en esta tesis presentaron un comportamiento similar.

V.1: PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y ACÚSTICAS DE ACEITES VEGETALES ENTRE 20HZ Y 2MHZ

En esta sección se presentan los resultados experimentales de las propiedades eléctricas (permitividad y conductividad) y de la velocidad del sonido de aceites vegetales comerciales de maíz, girasol, soja, uva, algodón, oliva, canola y chía. Si bien los resultados experimentales de la velocidad del sonido fueron obtenidos en el marco de la Tesis de Ingeniería del Ing. Arolfo [1,2], los mismos se presentan en esta sección ya que se utilizarán para caracterizar aceites vegetales. Los resultados presentados en esta sección han sido publicados en [3,4].

V.1.1. MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudiaron muestras de aceites vegetales de maíz, girasol, soja, uva, algodón, oliva, canola y chía. Todos los aceites son de origen comercial y se adquirieron en supermercados de la Ciudad de Buenos Aires. Las muestras fueron tomadas inmediatamente después de abrir los envases a fin de evitar el deterioro o contaminación de las mismas.

Las propiedades eléctricas fueron determinadas en el rango de frecuencias desde 20Hz hasta 2MHZ a temperaturas entre 300K y 343K.

La velocidad del sonido se determinó a las frecuencias de 1.53MHz, 5.66MHz y 9.43MHz y a temperaturas entre 303K y 323K (± 0.1 K). Las mediciones fueron realizadas por el Ing. Martín Arolfo en el marco de su Tesis de Ingeniería Mecánica [1,2], la cual fue realizada en el GER. El procedimiento de medición de la velocidad del sonido se describe en el Anexo 7.

V.1.2. PERMITIVIDAD DE ACEITES VEGETALES

En la Tabla V.1.1 se muestran los valores de la parte real de la permitividad relativa, ϵ'_r , de los aceites vegetales estudiados a cada temperatura de medición.

Permitividad relativa					
Aceite vegetal	303K	308K	313K	318K	323K
Soja	3.13	3.11	3.09	3.08	3.06
Oliva	3.12	3.10	3.08	3.07	3.05
Canola	3.08	3.07	3.05	3.03	3.01
Girasol	3.16	3.14	3.12	3.10	3.08
Chia	3.24	3.22	3.20	3.18	3.16
Uva	3.21	3.19	3.17	3.15	3.13
Maiz	3.15	3.13	3.11	3.09	3.07

Tabla V.1.1 - Parte real de la permitividad relativa de aceites vegetales a cada temperatura de medición.

En la Figura V.1.2 se grafican los valores de la Tabla V.1.1 en función de la temperatura. Los símbolos representan los valores experimentales y las líneas continuas representan el ajuste de la Ec. III.27.

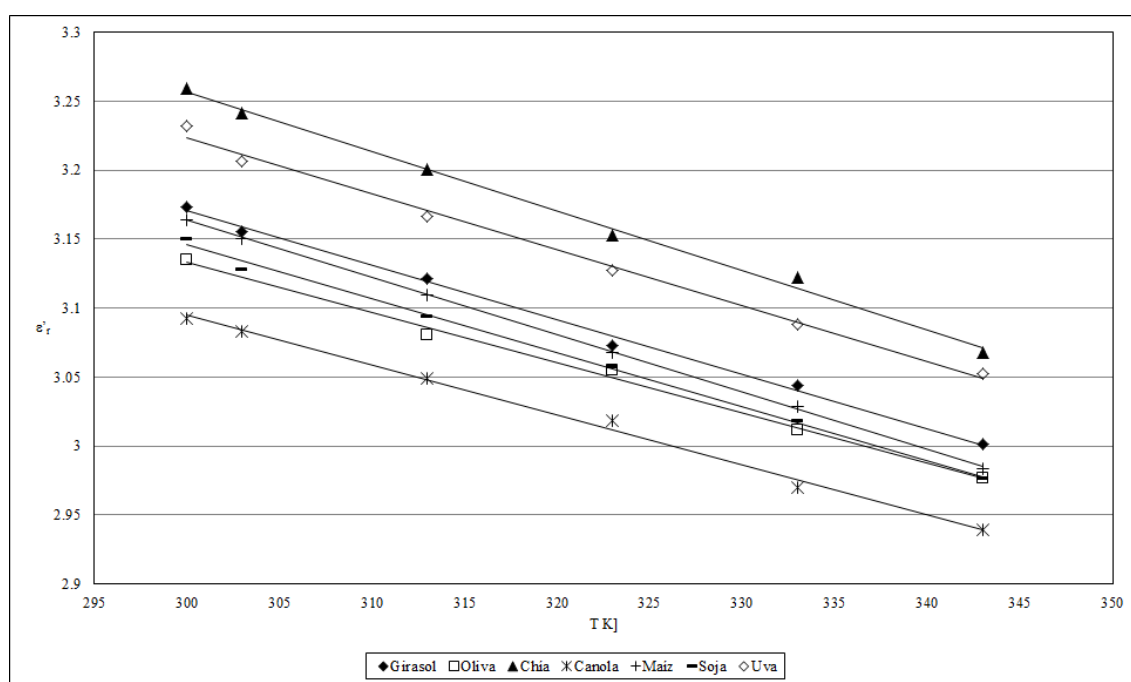


Figura V.1.2 - Parte real de la permitividad relativa de aceites vegetales en función de la temperatura.

V.1.3. CONDUCTIVIDAD DE ACEITES VEGETALES

En la Tabla V.1.3 se listan los valores de la conductividad, σ_o , de los aceites vegetales.

Aceite	Conductividad [S/m]					
	300K	303K	313K	323K	333K	343K
Girasol	3.1E-11	4.2E-11	3.7E-11	1.3E-10	1.7E-10	2.7E-10
Oliva	5.5E-11	-	2.2E-11	4.3E-11	5.4E-11	1.0E-10
Chia	2.4E-10	3.0E-10	4.9E-10	6.8E-10	1.0E-09	1.4E-09
Canola	-	-	1.1E-11	8.1E-12	3.2E-11	2.7E-11
Maiz	2.0E-12	2.9E-11	2.7E-11	2.1E-11	7.7E-11	1.5E-10
Soja	1.9E-11	5.9E-11	9.8E-11	1.5E-10	3.0E-10	3.8E-10
Uva	7.3E-11	1.1E-10	2.2E-10	2.7E-10	4.6E-10	6.4E-10

Tabla V.1.2 - Conductividad de aceites vegetales a cada temperatura de medición.

En la Figura V.1.3 se grafican los valores de la Tabla V.1.2 en función de la inversa de la temperatura ($1/T$). Los símbolos representan los valores de la conductividad y las líneas representan el ajuste de la dependencia Arrhenius, Ec. III.28.

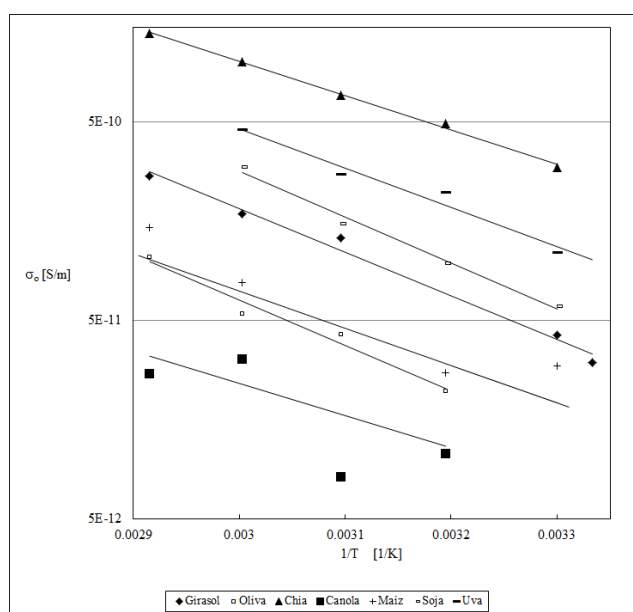


Figura V.1.3 - Conductividad de aceites vegetales en función de la inversa de la temperatura.

V.1.4. VELOCIDAD DEL SONIDO DE ACEITES VEGETALES

En la Tabla V.1.3 se muestran los valores experimentales de la velocidad del sonido de las muestras de aceite vegetal. Estos valores fueron tomados de [1,2].

Velocidad del sonido [m/s]					
Aceite vegetal	303K	308K	313K	318K	323K
Soja	1435	1420	1402	1387	1370
Oliva	1431	1414	1398	1382	1366
Canola	1436	1418	1403	1387	1371
Girasol	1437	1421	1403	1388	1371
Chia	1448	1429	1415	1398	1381
Uva	1438	1421	1404	1390	1372
Maiz	1436	1419	1399	1388	1372

Tabla V.1.3 - Valores experimentales de la velocidad del sonido de aceites vegetales a cada temperatura de medición [1,2].

En la Figura V.1.4 se grafican los valores de la Tabla V.1.3 en función de la temperatura de medición. Los valores corresponden a la frecuencia de medición de 9.3 MHz, y fueron obtenidos por el Ing. Martín Arolfo durante su Tesis de Ingeniería Mecánica en el GER [1,2].

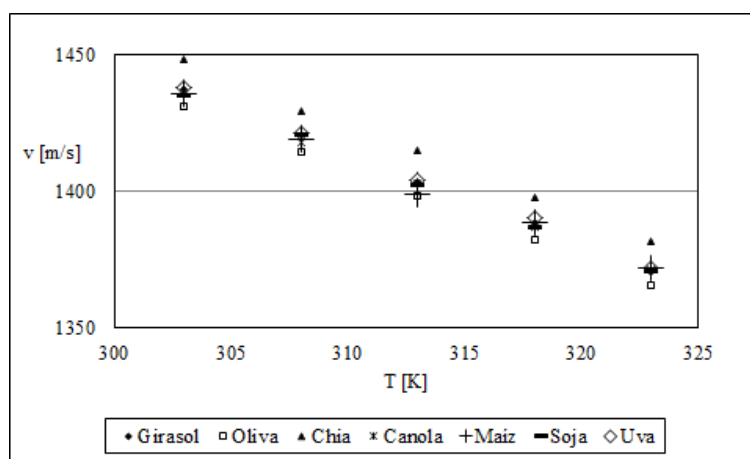


Figura V.1.4 - Velocidad del sonido de aceites vegetales en función de la temperatura. La frecuencia de medición fue 9.3MHz [1,2].

V.2: PERMITIVIDAD Y VISCOSIDAD DE GASOIL

En esta sección se presentan los resultados experimentales de la permitividad eléctrica y la viscosidad cinemática de las muestras de gasoil estudiadas. Si bien los resultados experimentales de la viscosidad cinemática fueron obtenidos por la Ing. Martina Colman [5], integrante del GER, los mismos se presentan en esta sección ya que se utilizarán para caracterizar gasoil.

V.2.1. MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras de gasoil de utilizadas fueron provistas por Shell e YPF. Cabe aclarar que las muestras de gasoil provistas no contenían el corte con biodiesel obligatorio por ley.

Las propiedades eléctricas se determinaron en muestras de ambas marcas, en las variantes de alto y bajo contenido de azufre, con y sin aditivos, en el rango de frecuencias entre 1kHz y 100kHz, a temperaturas entre 303K y 323K.

La viscosidad cinemática se determinó en gasoil con aditivos a temperaturas entre 298K y 318K utilizando un viscosímetro Cannon Fenske tamaño 50. Las mediciones fueron llevadas a cabo por la Ing. Martina Colman, integrante del GER [5] y se presentan en el Anexo 7.

V.2.2. PERMITIVIDAD DE GASOIL

En la Tabla V.2.1 se muestran los valores de la permitividad relativa de las muestras de gasoil estudiadas, a cada temperatura de medición.

En la Figura V.2.1 grafican los valores de la Tabla V.2.1 en función de la temperatura (símbolos). Como los datos experimentales toman valores muy próximos entre sí, no se grafican los ajustes de la Ec. III.27 a fin de lograr mayor claridad en la figura.

Permitividad relativa						
Gasoil	298K	303K	308K	313K	318K	323K
YPF 10 ppm sin aditivos	2.16	2.13	-	2.07	-	2.03
YPF 500 ppm sin aditivos	2.17	2.15	-	2.11	-	2.05
YPF 1500 ppm sin aditivos	2.20	2.18	-	2.13	-	2.08
YPF 10 ppm con aditivos	2.15	2.12	2.08	2.05	2.02	-
YPF 500 ppm con aditivos	2.19	2.19	-	2.15	-	2.12
Shell 10 ppm con aditivos	2.12	2.10	-	2.06	-	2.00
Shell 500 ppm con aditivos	2.14	2.13	-	2.09	-	2.06
Shell 1500 ppm con aditivos	2.14	2.10	-	2.04	-	2.03

Tabla V.2.1 - Parte real de la permitividad relativa de gasoil a cada temperatura de medición.

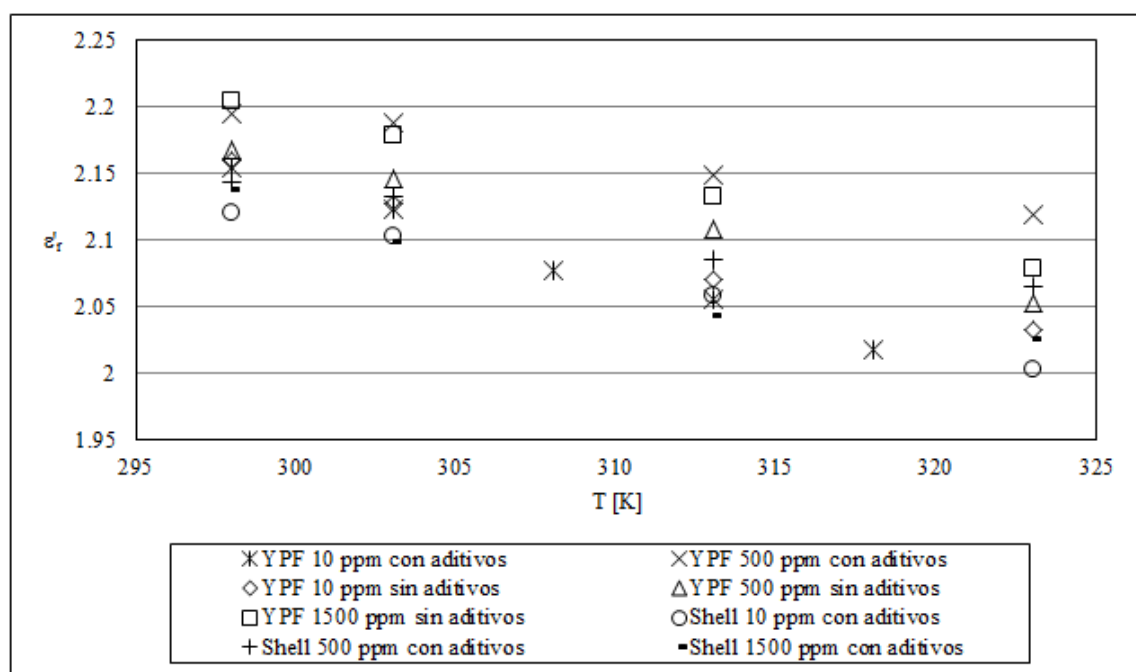


Figura V.2.1 - Parte real de la permitividad relativa de gasoil en función de la temperatura.

V.2.3. VISCOSIDAD CINEMÁTICA DE GASOIL

En la Tabla V.2.2 se listan los valores experimentales de la viscosidad de las muestras de gasoil, tomadas de [5].

Viscosidad cinemática [mm^2s^{-1}]					
Gasoil	298K	303K	308K	313K	318K
YPF 10 ppm con aditivos	3.038	2.731	2.468	2.254	2.017
YPF 500 ppm con aditivos	5.065	4.442	3.931	3.508	3.146
YPF 1500 ppm con aditivos	5.171	4.524	4.003	3.540	3.199

Tabla V.2.2 - Valores experimentales de la viscosidad de las muestras de gasoil a cada temperatura de medición [5].

En la Figura V.2.2 se grafican los valores de la Tabla V.2.2 en función de la temperatura (símbolos). Las mediciones fueron llevadas a cabo por la Ing. Martina Colman, integrante del GER, y se presentan en el Anexo 7.

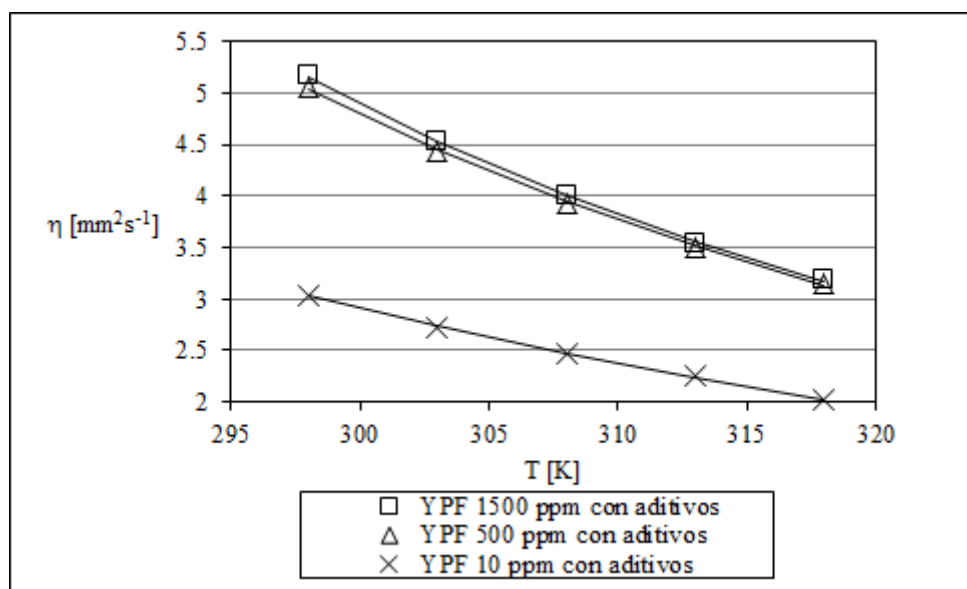


Figura V.2.2 - Viscosidad cinemática de las muestras de gasoil en función de la temperatura [5].

V.3: PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y ACÚSTICAS DE BIODIESEL

En esta sección se estudian las propiedades eléctricas (permitividad y conductividad) y la velocidad del sonido del biodiesel producido a partir de aceites vegetales comerciales de girasol, oliva, chía, canola, maíz, soja y uva, presentados en la sección V.1.

Si bien los resultados experimentales de la velocidad del sonido fueron obtenidos por el Ing. Martín Arolfo [1,2], los mismos se presentan en esta sección ya que se utilizarán para caracterizar biodiesel. Los resultados presentados en esta sección han sido publicados en [4].

V.3.1. MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras de biodiesel utilizadas fueron obtenidas por transesterificación a partir de aceites vegetales de girasol, oliva, chía, canola, maíz, soja y uva con metanol.

Las propiedades eléctricas de las muestras fueron determinadas en el rango de frecuencias entre 20Hz y 2MHz, a temperaturas entre 303K y 343K.

La velocidad del sonido fue determinada a las frecuencias de 1.53MHz, 5.66MHz y 9.43MHz, a temperaturas entre 303K y 323K. Las mediciones fueron realizadas por el Ing. Martín Arolfo en el marco de su Tesis de Ingeniería Mecánica [1,2], la cual fue realizada en el GER. En el Anexo 7 se describe el procedimiento de medición.

V.3.2. PERMITIVIDAD DE BIODIESEL

En la Tabla V.3.1 se muestran los valores de la parte real de la permitividad relativa de las muestras de biodiesel a cada temperatura de medición.

En la Figura V.3.1 se grafican los valores de la parte real de la permitividad relativa en función de la temperatura (símbolos). Las líneas continuas corresponden al modelo de la Ec. III.27 para cada una de las muestras.

Permitividad relativa					
Biodiesel	303K	308K	313K	318K	323K
Soja	3.19	3.16	3.14	3.12	3.10
Oliva	3.21	3.18	3.15	3.13	3.10
Canola	3.23	3.21	3.19	3.17	3.14
Girasol	3.25	3.22	3.20	3.17	3.15
Chia	3.33	3.30	3.28	3.26	3.23
Uva	3.25	3.23	3.20	3.17	3.15
Maiz	3.21	3.18	3.16	3.13	3.11

Tabla V.3.1 - Parte real de la permitividad relativa de biodiesel a cada temperatura de medición.

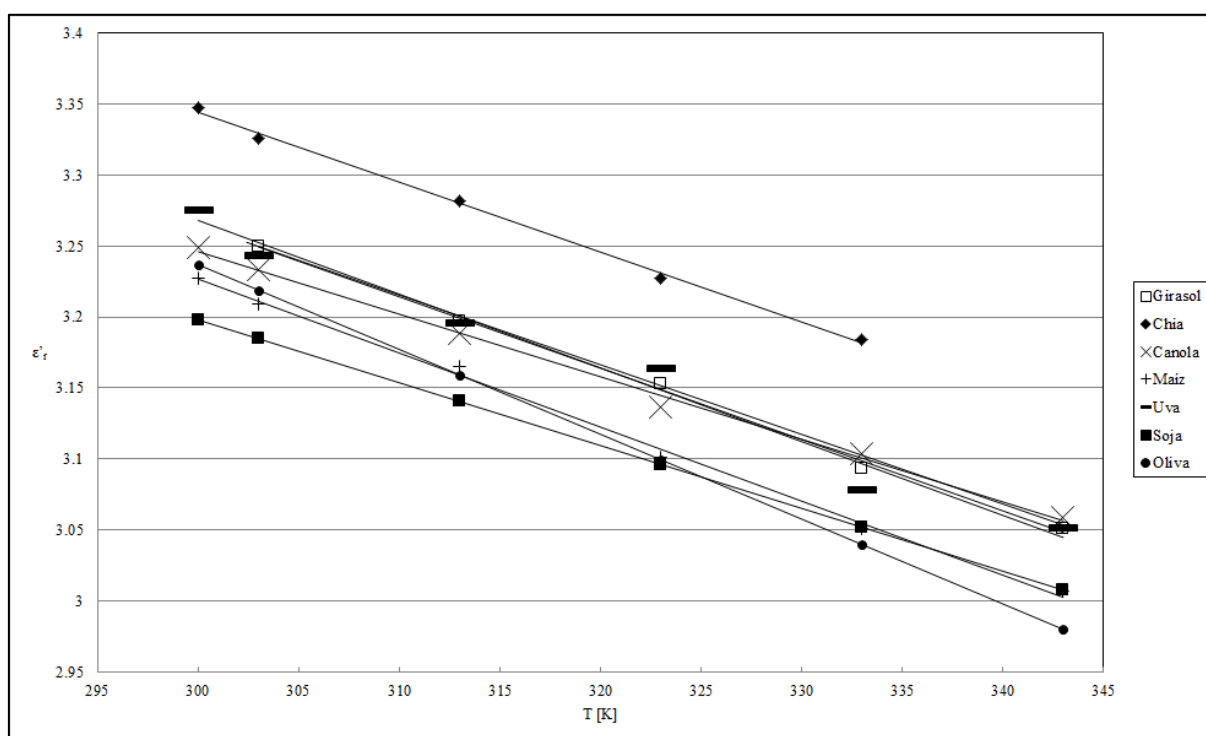


Figura V.3.1 - Parte real de la permitividad relativa de biodiesel en función de la temperatura.

V.3.3. CONDUCTIVIDAD DE BIODIESEL

En la Tabla V.3.2 se listan los valores de la conductividad eléctrica de las muestras de biodiesel estudiadas, a cada temperatura de medición.

Biodiesel	Conductividad [S/m]					
	303K	303K	313K	323K	333K	343K
Girasol	1.1E-10	1.4E-10	2.1E-10	-	3.2E-10	4.1E-10
Oliva	-	6.4E-11	1.1E-10	9.1E-11	1.6E-10	2.0E-10
Chia	-	3.9E-10	4.7E-10	6.4E-10	8.3E-10	9.3E-10
Canola	-	-	1.8E-10	2.1E-10	2.5E-10	3.0E-10
Maiz	4.7E-10	5.2E-10	6.9E-10	7.9E-10	1.1E-09	1.4E-09
Soja	1.7E-10	2.9E-10	4.0E-10	4.3E-10	5.6E-10	-
Uva	-	1.4E-09	1.9E-09	2.5E-09	3.0E-09	-

Tabla V.3.2 - Conductividad de biodiesel a cada temperatura de medición.

En la Figura V.3.2 se grafican los valores de la Tabla V.3.2 en función de la inversa de la temperatura. Las líneas continuas indican el ajuste de la Ec. III.28.

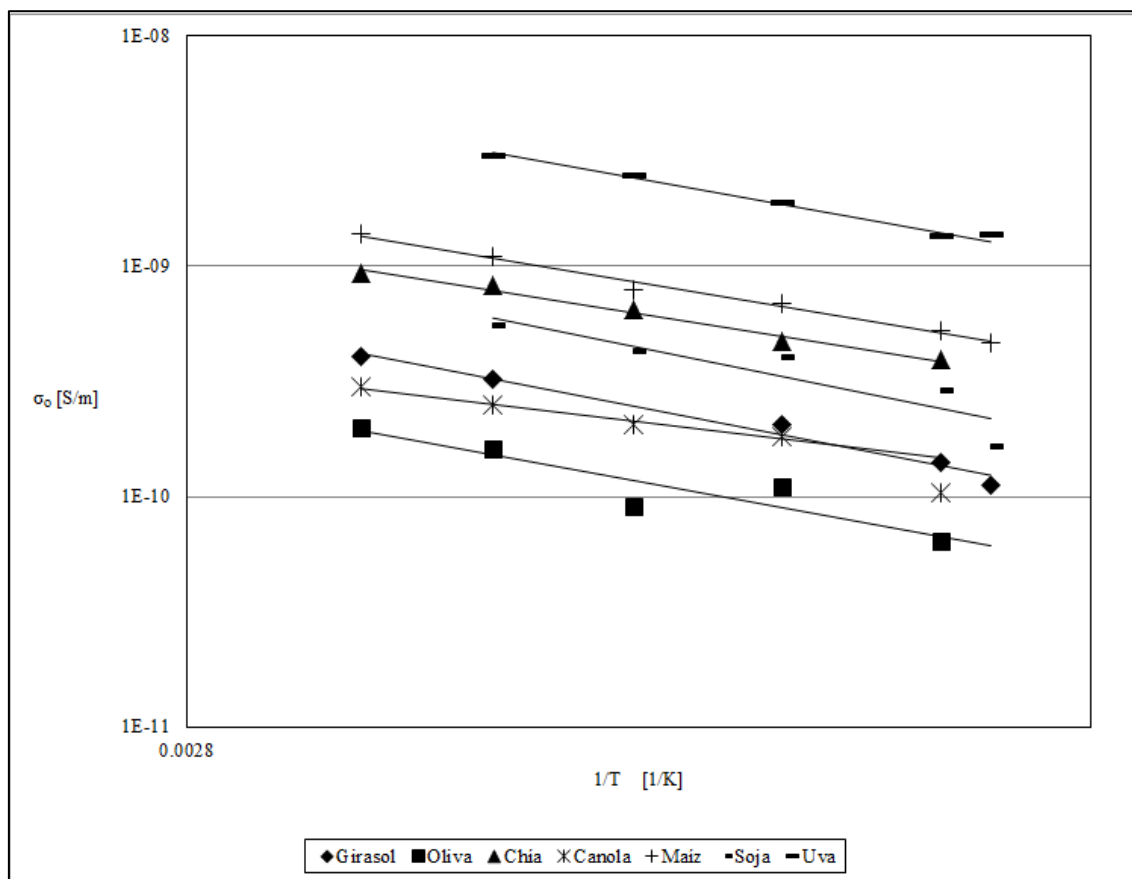


Figura V.3.2 - Conductividad de biodiesel en función de la inversa de la temperatura.

V.3.4. VELOCIDAD DEL SONIDO EN BIODIESEL

En la la Tabla V.3.3 se listan los valores experimentales de la velocidad del sonido de las muestras de biodiesel estudiadas, y fueron obtenidos por el Ing. Martín Arolfo durante su Tesis de Ingeniería Mecánica en el GER [1,2].

Velocidad del sonido [m/s]					
Biodiesel	303K	308K	313K	318K	323K
Soja	1378	1362	1342	1326	1309
Oliva	1372	1353	1336	1318	1302
Canola	-	1359	1341	1325	1308
Girasol	1373	1356	1340	1323	1305
Chia	1387	1370	1352	1335	1318
Uva	1379	1361	1344	1327	1310
Maiz	1377	1359	1342	1324	1308

Tabla V.3.3 - Velocidad del sonido a cada temperatura de medición. Datos obtenidos de [1,2].

En la Figura V.3.3 se grafican los valores de la Tabla V.3.3 en función de la temperatura (símbolos). Los datos graficados corresponden a la frecuencia de medición de 9.3 MHz.

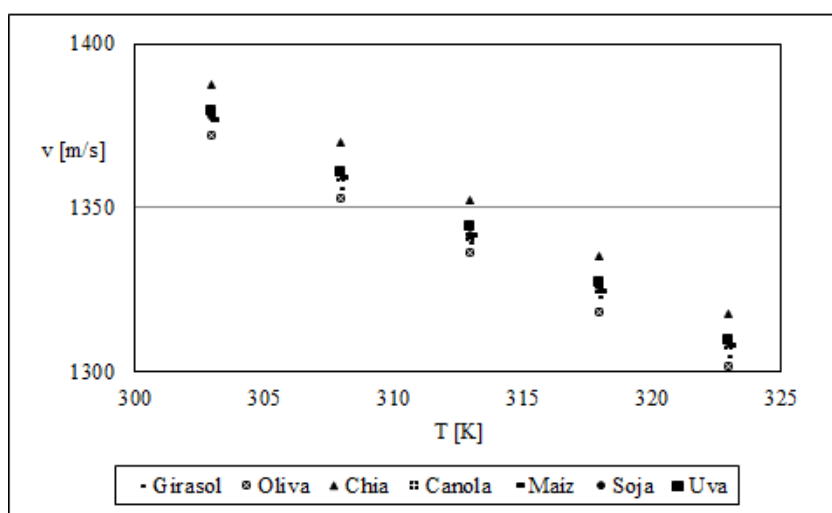


Figura V.3.3 - Velocidad del sonido de biodiesel en función de la temperatura. Datos obtenidos de [1,2]

V.4: PERMITIVIDAD Y VISCOSIDAD CINEMÁTICA DE MEZCLAS BIODIESEL/GASOIL

En esta sección se presentan los resultados experimentales de la permitividad relativa de biodiesel de soja industrial y sus mezclas con gasoil, en el rango completo de composición (0% a 100%) y a temperaturas entre 298K y 333K. Si bien los resultados experimentales de la viscosidad cinemática [5] fueron obtenidos por la Ing. Martina Colman [5], los mismos se presentan en esta sección ya que se utilizarán para caracterizar mezclas biodiesel/gasoil. Los resultados presentados en esta sección han sido publicados en [6,7,8].

V.4.1. MATERIALES Y MÉTODOS

Todas las muestras estudiadas en esta sección se prepararon con biodiesel industrial de soja provisto por un fabricante local, y verificaban la norma [9]. Las muestras de gasoil también fueron provistas por fabricantes locales y verificaban la norma [10]. Cabe aclarar que las muestras de gasoil no contenían el corte de biodiesel obligatorio por ley. Las mezclas biodiesel/gasoil fueron preparadas con biodiesel comercial de soja y gasoil comercial con contenido ultra bajo de azufre.

La permitividad relativa de las mezclas fue determinada en todo el rango de composición, entre 298K y 318K.

A partir de los resultados experimentales obtenidos previamente, se acotó el rango de frecuencia a 1kHz-100kHz. Además, este rango de frecuencia presenta algunas ventajas: los efectos de polarización de electrodos son minimizados y permite la utilización de equipos comerciales portátiles. Las mediciones se llevaron a cabo con un medidor de impedancia (Tonghui TH2822C). Por otro lado, debido a la volatilidad del gasoil, se utilizó una celda cerrada herméticamente para evitar la evaporación de las muestras.

Debido a que no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones a 1kHz, 10kHz y 100kHz, los resultados reportados corresponden a 100kHz. La conductividad de las muestras estudiadas en esta sección resultó depreciable en el rango de frecuencia estudiado.

Las mediciones de viscosidad cinemática se llevaron a cabo con un viscosímetro Cannon Fenske (Nº 50) en todo el rango de composición a temperaturas entre 298K y 318K. Las mediciones fueron llevadas a cabo por la Ing. Martina Colman, integrante del GER [5] y se presentan en el Anexo 7.

En todos los casos, la temperatura de las muestras se controló dentro de ± 0.1 K.

V.4.2. PERMITIVIDAD DE MEZCLAS BIODIESEL/GASOIL

En la Tabla V.4.1 se muestran los valores experimentales de la permitividad de las mezclas biodiesel/gasoil estudiadas, a cada temperatura de medición.

Muestra	298K	303K	308K	313K	318K	323K	328K	333K
B0	2.15	2.14	2.12	2.10	2.09	2.06	2.04	2.03
B5	2.18	2.17	2.14	2.13	2.11	2.09	2.07	2.05
B10	2.24	2.22	2.19	2.17	2.15	2.13	-	2.11
B20	2.32	2.31	2.28	-	2.25	2.21	2.19	2.17
B30	2.50	2.47	2.45	2.43	2.40	2.38	2.35	2.33
B40	2.57	2.54	2.51	2.48	2.43	2.41	2.37	2.36
B50	2.74	-	2.69	2.65	2.62	2.60	2.56	2.53
B60	2.79	2.76	2.74	2.70	2.66	2.63	2.60	2.57
B80	3.01	2.98	2.95	2.92	2.89	2.83	2.80	2.76
B100	3.29	3.24	3.20	3.16	3.11	3.07	3.03	3.00

Tabla V.4.1 - Parte real de la permitividad relativa de las mezclas biodiesel/gasoil a cada temperatura de medición.

En la Figura V.4.1 se grafican los valores de la Tabla V.4.1 en función de la temperatura y la composición. Las bandas de incerteza son más pequeñas que los símbolos.

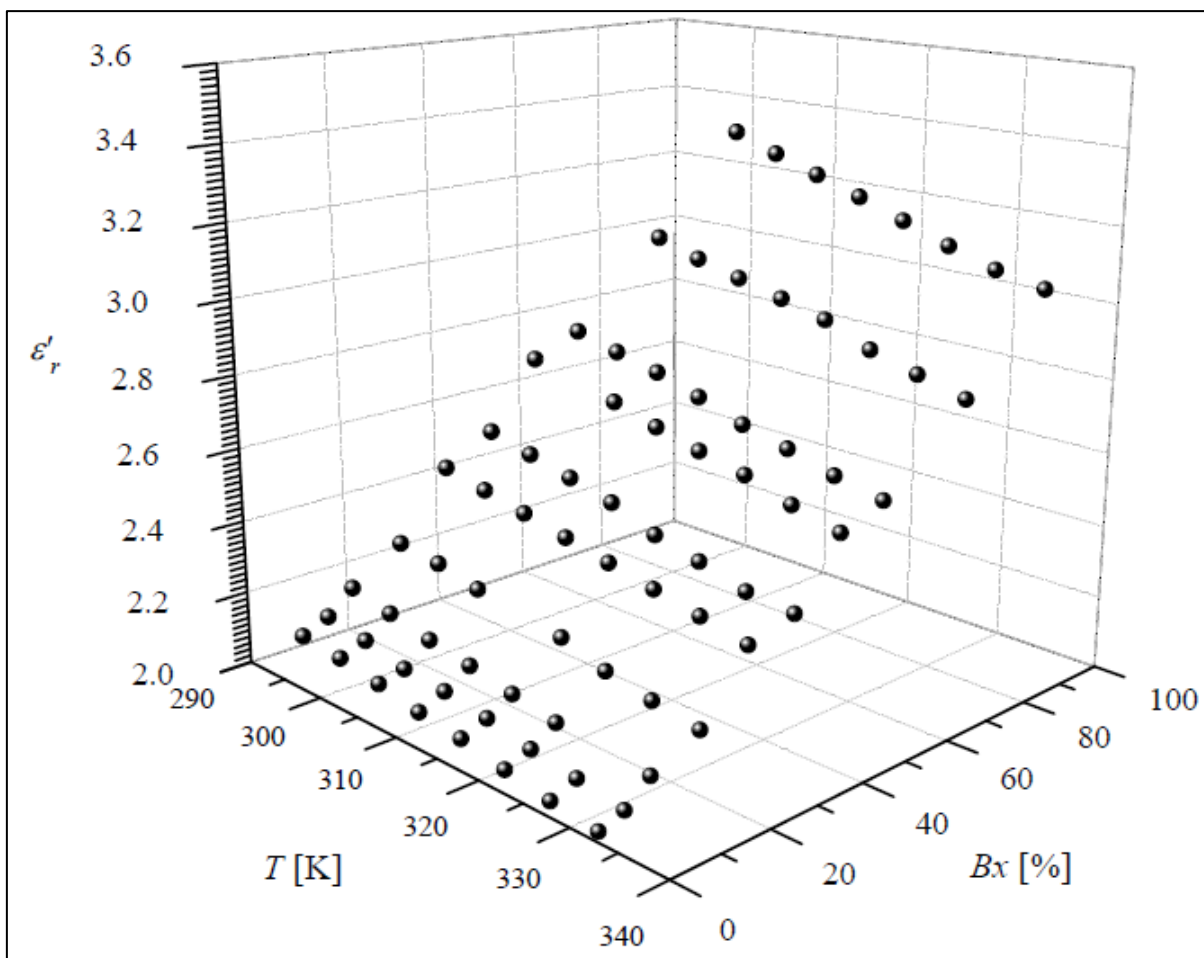


Figura V.4.1 - Parte real de la permitividad relativa de mezclas biodiesel/gasoil en función de la temperatura y del contenido de biodiesel.

V.4.3. VISCOSIDAD CINEMÁTICA DE MEZCLAS BIODIESEL/GASOIL

En la Tabla V.4.2 se listan los valores experimentales de la viscosidad cinemática. Los mismos fueron obtenidos por la Ing. Martina Colman, integrante del GER [5].

Muestra	η [mm ² s ⁻¹]				
	298K	303K	308K	313K	318K
B0	3.038	2.731	2.468	2.254	2.017
B10	3.217	2.889	2.610	2.375	2.168
B20	3.419	3.091	2.791	2.534	2.308
B30	3.649	3.270	2.946	2.678	2.442
B40	3.873	3.467	3.122	2.831	2.576
B50	4.170	3.706	3.353	3.025	2.748
B60	4.408	3.935	3.532	3.189	2.900
B70	4.754	4.242	3.813	3.439	3.149
B80	5.040	4.475	4.016	3.612	3.272
B90	5.321	4.763	4.260	3.842	3.478
B100	5.695	5.052	4.516	4.081	3.700

Tabla V.4.2 - Viscosidad cinemática de las mezclas biodiesel/gasoil. Datos obtenidos de [5].

En la Figura V.4.2 se grafican los valores de la Tabla V.4.2 en función de la temperatura y la composición.

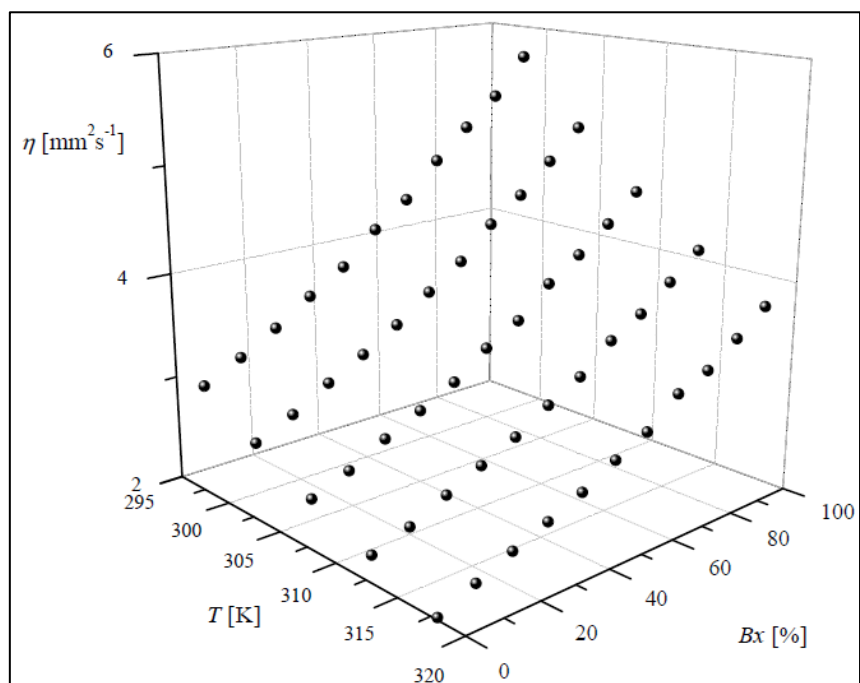


Figura V.4.2 - Viscosidad cinemática en función de la temperatura y la composición [5].

V.5: PERMITIVIDAD DE MEZCLAS DE BIODIESEL/ACEITE DE SOJA INDUSTRIALES

En esta sección se presentan los resultados experimentales de la permitividad relativa de mezclas de biodiesel y aceite de soja industriales, en el rango completo de composición (0% a 100%) y a temperaturas entre 298K y 343K. Las mediciones se llevaron a cabo en el rango de frecuencias entre 1kHz y 100kHz.

A diferencia de las sustancias utilizadas en la sección V.1 y V.3 (aceites vegetales para uso alimenticio y biodiesel obtenido en laboratorio a partir de los mismos), el aceite de soja y el biodiesel utilizados en esta sección fueron provistos por un fabricante industrial de biodiesel.

V.5.1. MATERIALES Y MÉTODOS

Se determinaron las propiedades eléctricas de mezclas de biodiesel y aceite de soja industriales, en el rango de frecuencias de medición de 1kHz hasta 100kHz y a temperaturas entre 298K y 343K.

Las mediciones presentadas en este capítulo se llevaron a cabo con la celda de acero que se describirá en el capítulo VII. La capacitancia en vacío (C_o) de esta celda es mucho mayor que la de las celdas con electrodos de platino, por lo que permite mejorar la resolución de las medidas. Esto reviste particular importancia para el estudio del sistema de este capítulo, ya que los valores de la permitividad del biodiesel y del aceite de soja son muy próximos entre sí en los rangos de temperatura y composición estudiados.

V.5.2. PERMITIVIDAD DE MEZCLAS BIODIESEL/ACEITE DE SOJA

En la Tabla V.5.1 se listan los valores de la parte real de la permitividad relativa de las mezclas biodiesel/aceite de soja, a cada temperatura de medición.

Bx	Permitividad relativa					
	298K	303K	313K	323K	333K	343K
B0	3.08	3.05	3.02	2.99	2.94	2.90
B10	3.08	3.07	3.03	3.01	2.94	2.93
B20	3.11	3.09	3.05	3.02	2.99	2.95
B30	3.12	3.10	3.07	3.04	3.00	2.96
B40	3.14	3.11	3.09	3.04	2.98	2.95
B50	3.17	3.14	3.10	3.07	3.02	2.98
B60	3.17	3.14	3.11	3.07	3.04	3.00
B70	3.19	3.17	3.14	3.10	3.04	2.99
B80	3.21	3.19	3.16	3.12	3.06	3.01
B90	3.22	3.19	3.14	3.09	3.05	3.01
B100	3.24	3.21	3.17	3.11	3.05	3.00

Tabla V.5.1 - Parte real de la permitividad relativa de mezclas biodiesel/aceite de soja.

En la Figura V.5.1 se grafican los valores de la Tabla V.5.1 en función de la temperatura y la composición. Si bien “ Bx ” suele indicar el contenido de biodiesel de las mezclas biodiesel/gasoil, se utilizará también para indicar el contenido de biodiesel de las mezclas biodiesel/aceite de soja.

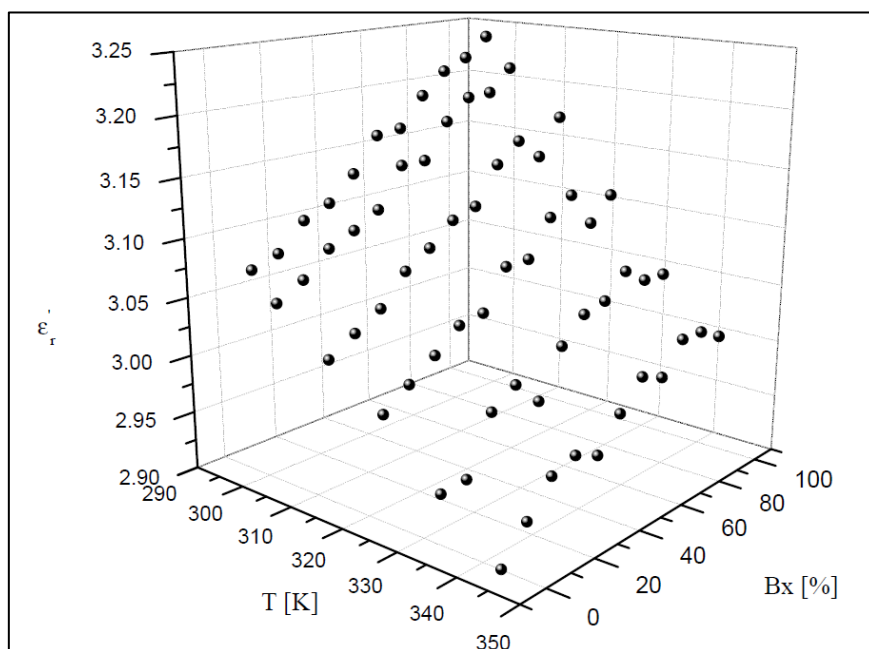


Figura V.5.1 - Parte real de la permitividad relativa de mezclas biodiesel/aceite de soja en función de la temperatura y del contenido de biodiesel.

Cabe aclarar que, como el biodiesel y el aceite de soja tienen valores de permitividad muy próximos y además la permitividad disminuye con la temperatura, las mediciones son más ruidosas a medida que la temperatura aumenta.

REFERENCIAS

[1] Arolfo M, Sorichetti PA, Romano SD. Aplicación de Interferometría ultrasónica para la caracterización e metilésteres de origen vegetal. Congreso Iberoamericano HYFUSEN 2011, Mar del Plata.

[2] Arolfo M. Aplicación de técnicas ultrasónicas para la medición de propiedades de aceites y metilésteres de origen vegetal. Tesis de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, 2013.

[3] Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Electrical properties of vegetable oils between 20 Hz and 2 MHz. *International Journal of Hydrogen Energy* 2014;39:8754-8758.

[4] Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Electrical and ultrasonic properties of vegetable oils and biodiesel. *Fuel* 2015;139:466-471.

[5] Colman M. Informe de actividades de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, 2017.

[6] Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Permittivity of biodiesel-rich blends with fossil diesel fuel: Application to biodiesel content estimation. *Fuel* 2016;177:268-273.

[7] Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Permittivity of diesel fossil fuel and blends with biodiesel in the full range from 0% to 100%: Application to biodiesel content estimation. *Fuel* 2017;188:367-373.

[8] Corach J, Colman M, Sorichetti PA, Romano SD. Kinematic viscosity of soybean biodiesel and diesel fossil fuel blends: Estimation from permittivity and temperature. *Fuel* 2017;207:488-492.

[9] EN 14214 (European standard for biodiesel): automotive fuels – fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines – requirements and test methods; 2008.

[10] ASTM D975-15c, Standard specification for diesel fuel oils; 2015.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS, MODELADO Y CORRELACIONES

En este capítulo se analizan los resultados experimentales presentados en el capítulo V. En base los análisis realizados, se proponen modelos para establecer relaciones entre las propiedades de los sistemas estudiados, como función de la temperatura y la composición:

- permitividad
- conductividad
- viscosidad cinemática
- velocidad del sonido

Los métodos matemáticos y algoritmos para la obtención de los parámetros de los modelos y sus incertezas se describen en el Anexo 6.

VI.1. PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y ACÚSTICAS DE ACEITES VEGETALES Y BIODIESEL DE DISTINTOS ORÍGENES

En esta sección se analizan y comparan los resultados experimentales de las mediciones de propiedades eléctricas y acústicas de los aceites vegetales comerciales y biodiesel obtenidos a partir de los mismos, presentados respectivamente en las secciones V.1 y V.3.

Las propiedades eléctricas han sido utilizadas en la industria alimentaria para caracterizar aceites vegetales, ya que ofrecen información valiosa de sus características y calidad [1,2,3,4,5]. En general, los trabajos apuntan a analizar la variación del valor de la permitividad y de la conductividad, luego de someter los aceites a tratamientos, tales como calentamiento durante varios días. [1,2,3,4,5]. Existen algunos trabajos sobre propiedades eléctricas de biodiesel [6,7,8,9,10], pero en algunos casos [6,7,8] no se analiza la dependencia de las mismas con la temperatura, y se limitan a mediciones de impedancia, sin determinar las propiedades intrínsecas de las sustancias (permitividad y conductividad).

En cuanto a las propiedades acústicas, en la literatura se encuentran trabajos sobre ésteres puros, sus mezclas y biodiesel [11,12,13,14,15], pero los datos sobre aceites vegetales son muy escasos.

Como se indicó en el capítulo I, una de las posibles aplicaciones de las propiedades eléctricas y acústicas es la caracterización de biodiesel, aceites vegetales y sus mezclas. Esta caracterización podría permitir determinar la composición de una mezcla de biodiesel y aceite vegetal, y, por ejemplo, detectar muestras adulteradas [17]. En ambos casos, es necesario contar con valores de referencia de las propiedades eléctricas y acústicas de las sustancias sin mezclar.

Debido a que las materias primas utilizadas para la producción de biodiesel varían según el país de producción [10,18,19], es importante establecer los rangos de valores de las propiedades eléctricas y acústicas de distintos aceites vegetales y biodiesel producido a partir de los mismos. Esto permite generalizar resultados previamente obtenidos para las propiedades eléctricas de aceite y biodiesel de soja y canola [10,20].

VI.1.1. PERMITIVIDAD

En la Tabla VI.1.1 se listan los valores de los parámetros de ajuste al modelo de la Ec. III.27, obtenidos a partir de los resultados experimentales de cada aceite vegetal presentados en la sección V.1: $\varepsilon'_r(T_o)$ y $d\varepsilon'_r/dT$, con sus incertezas, $\Delta\varepsilon'_r(T_o)$ y $\Delta d\varepsilon'_r/dT$, la incerteza RMS del ajuste, $\Delta\varepsilon'_r$, y el coeficiente de determinación, R^2 . La temperatura de referencia es $T_o=318K$.

Origen	$\varepsilon'_r(T_o=318K)$	$\Delta\varepsilon'_r(T_o)$	$d\varepsilon'_r/dT [K^{-1}]$	$\Delta d\varepsilon'_r/dT [K^{-1}]$	$\Delta\varepsilon'_r(T)$	R^2
Girasol	3.10	< 0.01	-0.0039	0.0002	< 0.01	0.996
Oliva	3.07	< 0.01	-0.0036	0.0002	< 0.01	0.998
Chia	3.18	< 0.01	-0.0043	0.0003	< 0.01	0.996
Canola	3.03	< 0.01	-0.0036	0.0002	< 0.01	0.996
Maíz	3.09	< 0.01	-0.0042	0.0001	< 0.01	0.999
Soja	3.08	< 0.01	-0.0039	0.0002	< 0.01	0.997
Uva	3.15	< 0.01	-0.0039	0.0001	< 0.01	0.999

Tabla VI.1.1 - Valores de los parámetros de ajuste de la parte real de la permitividad (Ec. III.27) de las muestras de aceites vegetales.

A partir de la Figura V.1.2 y de la Tabla V.1.1, se observa que la parte real de la permitividad de todos los aceites vegetales estudiados, decrece con la temperatura. Además, como puede observarse en la Tabla VI.1.1, el ajuste a la Ec. III.27 es muy satisfactorio en todos los casos ($R^2>0.996$), y los parámetros de ajuste tienen valores muy similares entre sí.

A fin de visualizar más fácilmente los resultados mostrados en la Tabla VI.1.1, los mismos son representados en la Figura VI.1.1. Los intervalos de incertidumbre (indicados con líneas discontinuas) corresponden a dos desvíos estándar.

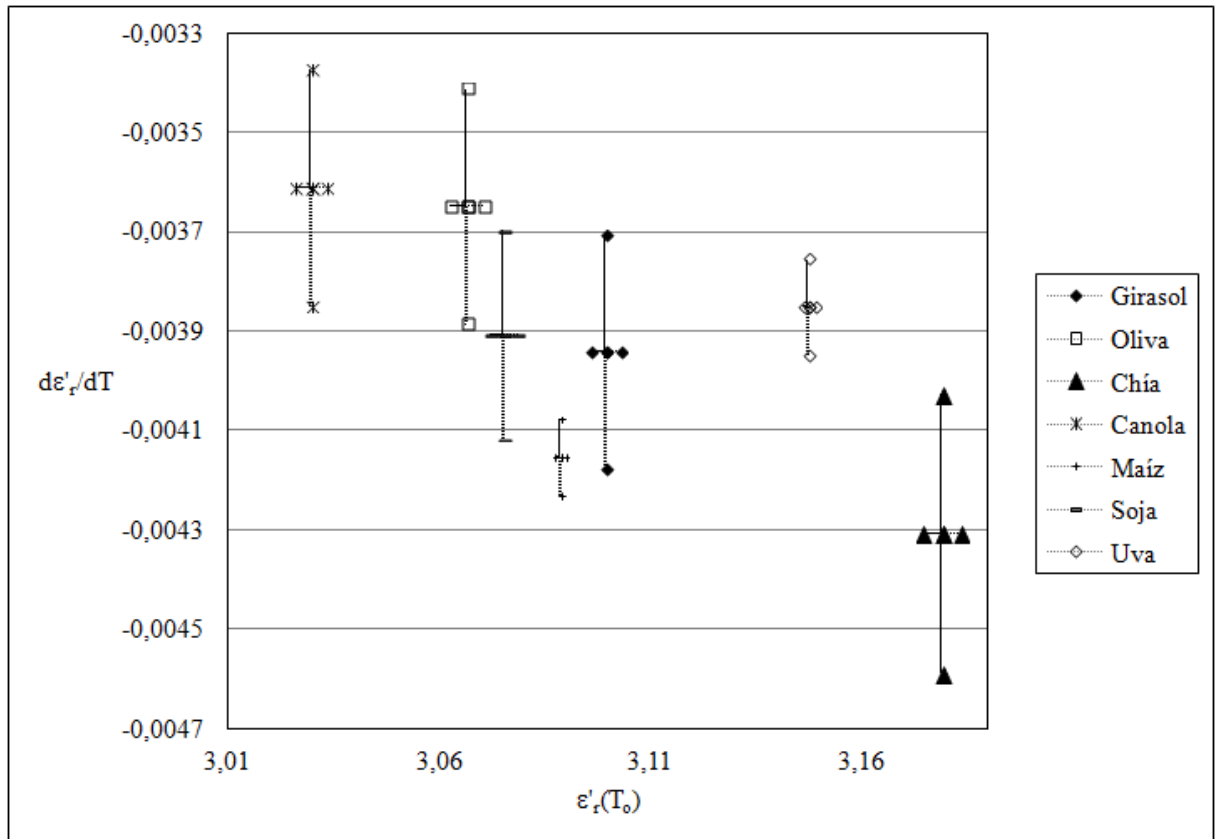


Figura VI.1.1 - Parámetros de ajuste de la parte real de la permitividad de las muestras de aceites vegetales a la temperatura de referencia ($T_o=318K$).

A partir de la Figura VI.1.1 y la Tabla VI.1.1, puede verse que los valores de $\varepsilon'_r(T_o)$ están comprendidos entre 3.03 (canola) y 3.18 (chía) y que la incertidumbre relativa es menor al 0.2%, en todas las muestras. Los valores del coeficiente de temperatura, $d\varepsilon'_r/dT$, están en el rango entre $-4.3 \times 10^{-3}K^{-1}$ (chía) a $-3.6 \times 10^{-3}K^{-1}$ (oliva), con una incertidumbre menor al 8%, en todas las muestras.

En resumen, se observa que los parámetros de ajuste de la parte real de la permitividad de los aceites vegetales están comprendidos en un rango de valores muy estrecho.

En la Tabla VI.1.2 se listan los valores de los parámetros de ajuste al modelo de la Ec. III.27, obtenidos a partir de los datos experimentales de cada biodiesel, presentados en la sección V.3: $\varepsilon'_r(T_o)$ y $d\varepsilon'_r/dT$, sus incertezas, $\Delta\varepsilon'_r(T_o)$ y $\Delta d\varepsilon'_r/dT$, la incerteza RMS del ajuste, $\Delta\varepsilon'_r$, y el coeficiente de determinación, R^2 . La temperatura de referencia es $T_o=318K$.

Origen	$\varepsilon'_r(T_o=318K)$	$\Delta \varepsilon'_r(T_o)$	$d\varepsilon'_r/dT [K^{-1}]$	$\Delta d\varepsilon'_r/dT [K^{-1}]$	$\Delta \varepsilon'_r(T)$	R^2
Girasol	3.17	< 0.01	-0.0050	0.0003	< 0.01	0.998
Oliva	3.13	< 0.01	-0.0060	0.0001	< 0.01	0.998
Chia	3.26	< 0.01	-0.0049	0.0003	< 0.01	0.998
Canola	3.17	< 0.01	-0.0044	0.0003	< 0.01	0.997
Maiz	3.13	< 0.01	-0.0052	0.0003	< 0.01	0.997
Soja	3.12	< 0.01	-0.0044	0.0001	< 0.01	0.999
Uva	3.17	< 0.01	-0.0052	0.0007	< 0.01	0.980

Tabla VI.1.2 - Valores de los parámetros de ajuste de la parte real de la permitividad de (Ec. III.27) de las muestras de biodiesel.

A partir de la Tabla VI.1.2 puede verse que los valores de $\varepsilon'_r(T_o)$ de las muestras de biodiesel, $\varepsilon'_r(T_o)$ están entre 3.12 (soja) y 3.26 (chía). Los coeficientes de determinación, R^2 , muestran que en todos los casos los valores experimentales se ajustan muy bien al modelo de la Ec. III.27.

Como en el caso de los aceites vegetales, en la Figura VI.1.2 se representan los valores de los parámetros de ajuste correspondientes al biodiesel, listados en la Tabla VI.1.2. La temperatura de referencia, T_o , es 318K y las bandas de incerteza (indicados con líneas discontinuas) corresponden a dos desvíos estándar.

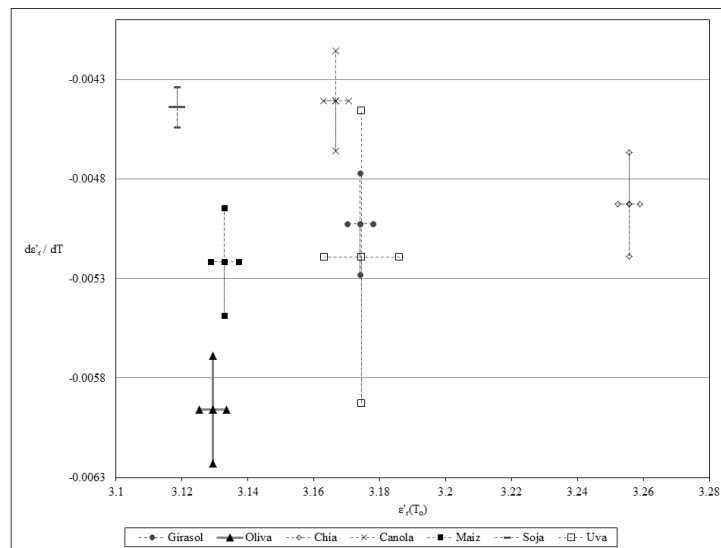


Figura VI.1.2 - Parámetros de ajuste de la parte real de la permitividad de las muestras de biodiesel a la temperatura de referencia ($T_o=318K$).

En la Figura VI.1.2 se observa que los parámetros de ajuste de la Ec. III.27 de los biodiesel estudiados se encuentran en una franja muy estrecha de valores.

Resulta de interés comparar los valores de la permitividad de las muestras de aceite vegetal y biodiesel. En la Figura VI.1.3 se grafican los valores de la permitividad en función de la temperatura de las muestras de aceite vegetal y biodiesel de girasol presentados en las secciones V.1 y V.3 con símbolos, y con línea continua los ajustes de la Ec. III.27.

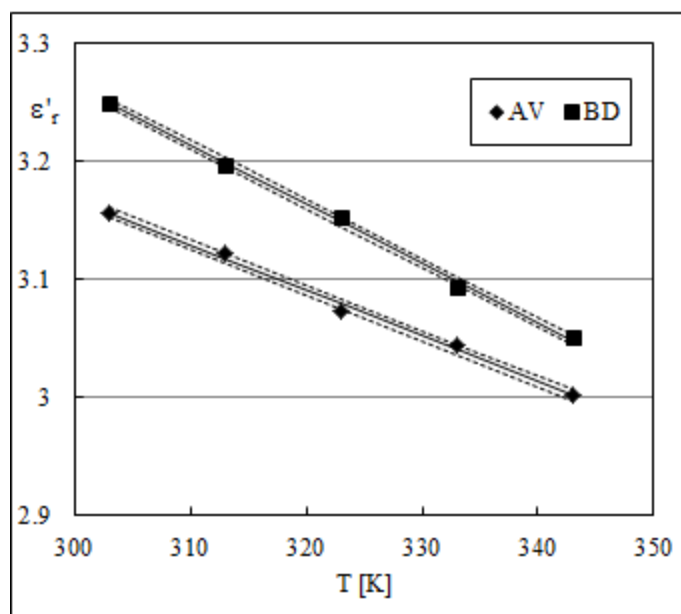


Figura VI.1.3 - Parte real de la permitividad de muestras de aceite vegetal (AV) y biodiesel de girasol (BD) en función de la temperatura.

En la Figura VI.1.3 se observa que la permitividad del biodiesel es mayor que la del aceite vegetal, dentro del rango de temperatura estudiado. Si bien la Figura VI.1.3 corresponde a las muestras de aceite vegetal y biodiesel de girasol, todas las muestras estudiadas en las secciones V.1 y V.3 presentan un comportamiento similar, por lo que se omiten sus gráficas. También se observa que, como la permitividad del biodiesel decrece más rápidamente con la temperatura que el aceite vegetal correspondiente, la diferencia entre los valores de permitividad de ambas sustancias se reduce con la temperatura. Esto dificulta distinguir entre muestras de aceite vegetal y biodiesel a temperaturas más elevadas, ya que los valores de la permitividad son más próximos

entre sí. Por ejemplo, a 343K, la permitividad del biodiesel es solamente un 5% mayor que la del aceite vegetal.

En la Figura VI.1.4 se grafican los parámetros de ajuste, $\varepsilon'_r(T_o)$ y $d\varepsilon'_r/dT$, de los aceites vegetales y biodiesel de oliva, girasol y maíz. Las líneas punteadas corresponden a las bandas de incerteza de los parámetros (dos desvíos estándar).

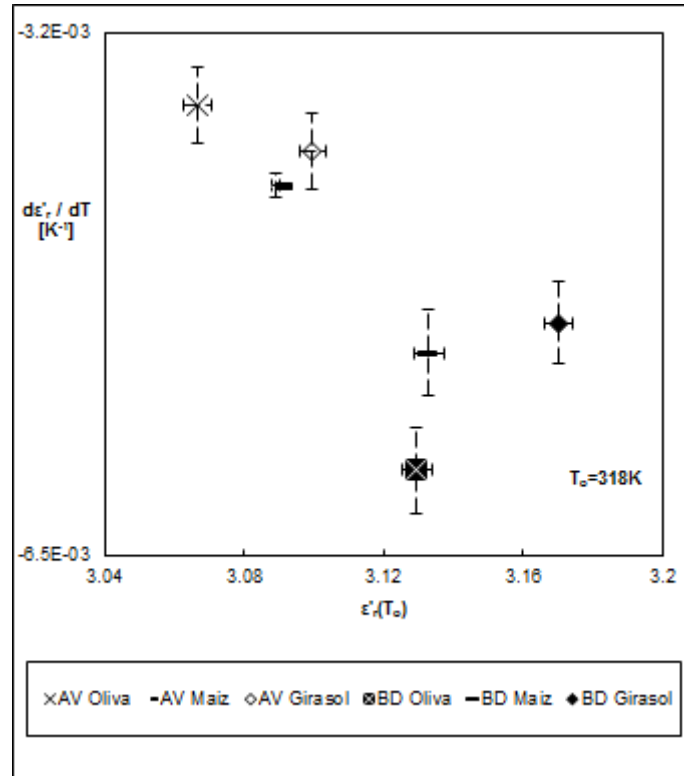


Figura VI.1.4 - Parámetros de ajuste de la parte real de la permitividad ($\varepsilon'_r(T_o)$ y $d\varepsilon'_r/dT$) y sus incertezas, de muestras de aceites vegetales y biodiesel.

A partir de la Figura VI.1.4, es claro que tanto el módulo de $\varepsilon'_r(T_o)$ como el de $d\varepsilon'_r/dT$ de las muestras de biodiesel son mayores que las de aceites vegetales. Esto es esperable ya que la polaridad de las moléculas de biodiesel es mayor que la de los aceites vegetales [10]. En la Figura VI.1.4 se grafican solamente los parámetros de aceite vegetal y biodiesel de oliva, girasol y maíz para mayor claridad. Cabe aclarar que todas las muestras estudiadas tienen el mismo comportamiento.

VI.1.2. CONDUCTIVIDAD

Si bien la conductividad de los aceites vegetales es baja a temperatura ambiente, la misma aumenta rápidamente con la temperatura, según puede verse en la Tabla V.1.2 y en la Figura V.1.2. Este comportamiento puede ser modelado satisfactoriamente mediante una función de Arrhenius (Ec. III.28) [10,20].

En la Tabla VI.1.3 se listan los valores de los parámetros de ajuste al modelo de la Ec. III.28 de los aceites vegetales estudiados: el coeficiente pre-exponencial, σ_o , la energía de activación E junto a su incerteza relativa $\Delta E/E$ y el coeficiente de determinación R^2 del ajuste de cada muestra. Cabe mencionar que el coeficiente de determinación, R^2 , es mayor que 0.96 en todos los casos.

Origen	σ_o [S/m]	E [eV]	$\Delta E/E$ [%]	R^2
Girasol	7.24E-04	0.44	6	0.989
Oliva	4.70E-04	0.46	12	0.971
Chía	1.58E-04	0.34	3	0.997
Maíz	4.70E-03	0.51	7	0.994
Soja	2.53E-03	0.46	7	0.989
Uva	4.00E-04	0.39	13	0.967

Tabla VI.1.3 - Valores de los parámetros de ajuste al modelo de la Ec. III. 27 de los aceites vegetales.

Los valores de las energías de activación de la conductividad están comprendidos entre 0.34eV (chía) y 0.46eV (soja y oliva) y son consistentes con resultados previamente publicados [10,20]. En contraste, el valor del factor pre-exponencial, σ_o , varía apreciablemente entre las distintas muestras, ya que en general depende de la presencia de trazas de contaminantes.

A partir de la Figura V.1.2 y de la Tabla VI.1.3, puede observarse que los ajustes al modelo de la Ec. III.28 son satisfactorios. Los parámetros de ajuste del aceite de canola no se listan ya que la conductividad del mismo, a todas las temperaturas medidas, era muy cercana al umbral de detección del sistema de medición.

En la Tabla VI.1.4 se listan los valores de parámetros de ajuste al modelo de la Ec. III.28 de los biodiesel estudiados: el coeficiente pre-exponencial, σ_o , la energía de

activación E junto a su incerteza relativa y el coeficiente de determinación R^2 del ajuste de cada muestra.

Origen	σ_o [S/m]	E [eV]	$\Delta E/E$ [%]	R^2
Girasol	2.1E-06	0.25	8.3	0.980
Oliva	5.9E-07	0.24	23.1	0.862
Chía	1.0E-06	0.21	7.4	0.984
Canola	5.5E-08	0.16	7.4	0.989
Maíz	2.1E-06	0.22	4.8	0.991
Soja	5.5E-06	0.26	26.4	0.827
Uva	1.0E-05	0.23	5.6	0.994

Tabla VI.1.4 - Valores de los parámetros de ajuste al modelo de la Ec. III.27 de los biodiesel.

A partir de la Figura V.3.2 y de la Tabla VI.3.2, se observa que el ajuste de la Ec. III.28 es satisfactorio en todas las muestras de biodiesel ($R^2 > 0.96$).

Como en el caso de la permitividad, también resulta de interés comparar las energías de activación de la conductividad de los aceites vegetales y biodiesel. Cabe señalar que se escoge este parámetro para realizar la comparación, y no el factor pre-exponencial, porque el valor del último varía apreciablemente dependiendo de factores como la pureza del aceite, el contenido de humedad, presencia de contaminantes etc.

En la Figura VI.1.5 se grafican los valores de la energía de activación de la conductividad, E , de las muestras de aceites vegetales y biodiesel. Los valores representativos están dados junto a sus bandas de incerteza (un desvío estándar).

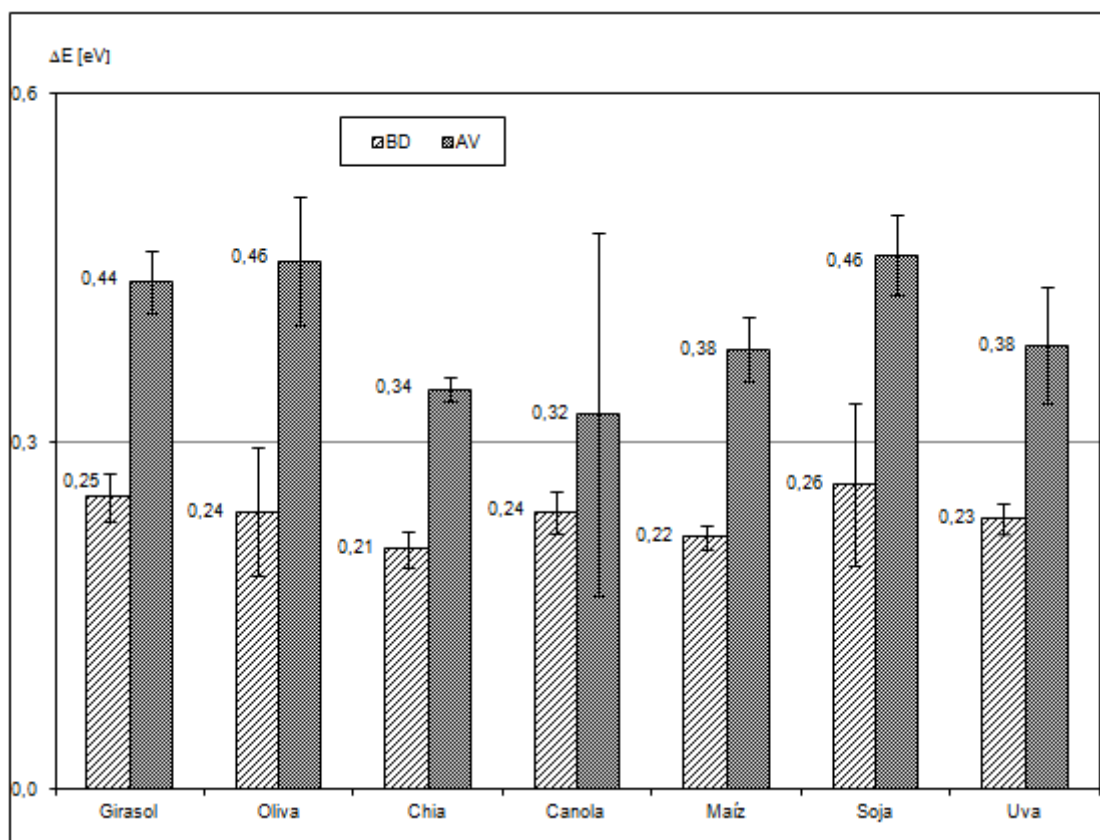


Figura VI.1.5 - Energía de activación de la conductividad (E) de aceites vegetales y biodiesel.

Como puede verse en la Figura VI.1.5, hay una reducción de aproximadamente el 60% en el valor de E luego de la transesterificación de los aceites vegetales. La energía de activación de las muestras de biodiesel está entre 0.21eV (chía) y 0.26eV (soja), mientras que para las muestras de aceites vegetales está entre 0.32eV (canola) y 0.46eV (oliva y soja). La incerteza de la energía de activación de las muestras de canola es mayor porque el valor de conductividad es muy cercano al límite de detección del sistema de medición.

VI.1.3. VELOCIDAD DEL SONIDO

Los datos experimentales de aceites vegetales obtenidos por [21,22], fueron ajustados con la Ec. A.7.1. En la Tabla VI.1.5 se muestran los valores de los parámetros del ajuste: ($v(T_o)$ y dv/dT), sus incertezas ($\Delta v(T_o)$ y $\Delta dv/dT$), el coeficiente de determinación

(R^2) y la incerteza RMS del ajuste ($\Delta v(T)$), para cada aceite vegetal. La temperatura de referencia es $T_o=318\text{K}$.

Origen	$v(T_o=318\text{K})$ [ms^{-1}]	$\Delta v(T_o)$ [ms^{-1}]	dv/dT [$\text{ms}^{-1}\text{K}^{-1}$]	$\Delta(dv/dT)$ [$\text{ms}^{-1}\text{K}^{-1}$]	$\Delta v(T)$ [ms^{-1}]	R^2
Girasol	1387.6	0.4	-3.3	< 0.1	0.6	0.999
Oliva	1381.9	0.1	-3.3	< 0.1	0.2	0.999
Chía	1397.8	0.5	-3.3	0.1	1.0	0.999
Canola	1386.9	0.5	-3.2	0.1	0.9	0.999
Maíz	1386.9	1.5	-3.2	0.2	2.8	0.999
Soja	1386.7	0.4	-3.3	0.1	0.8	0.999
Uva	1388.6	0.6	-3.3	0.1	1.1	0.999

Tabla VI.1.5 - Parámetros de ajuste de la Ec. A.7.1 de las muestras de aceites vegetales.

Los valores de la velocidad del sonido a la temperatura de referencia ($T_o=318\text{K}$), $v(T_o)$, de las muestras de aceites vegetales están entre 1398ms^{-1} (chía) y 1382ms^{-1} (oliva). La incerteza relativa es menor al 0.1% para todas las muestras estudiadas. El coeficiente de temperatura, dv/dT , está entre $-3.1\text{ms}^{-1}\text{K}^{-1}$ (maíz) y $-3.3\text{ms}^{-1}\text{K}^{-1}$ (girasol) con una incerteza relativa menor al 6%.

Para facilitar la visualización de los resultados, en la Figura VI.1.6 se muestran los parámetros $v(T_o)$ y dv/dT de los aceites vegetales estudiados, junto a sus incertezas.

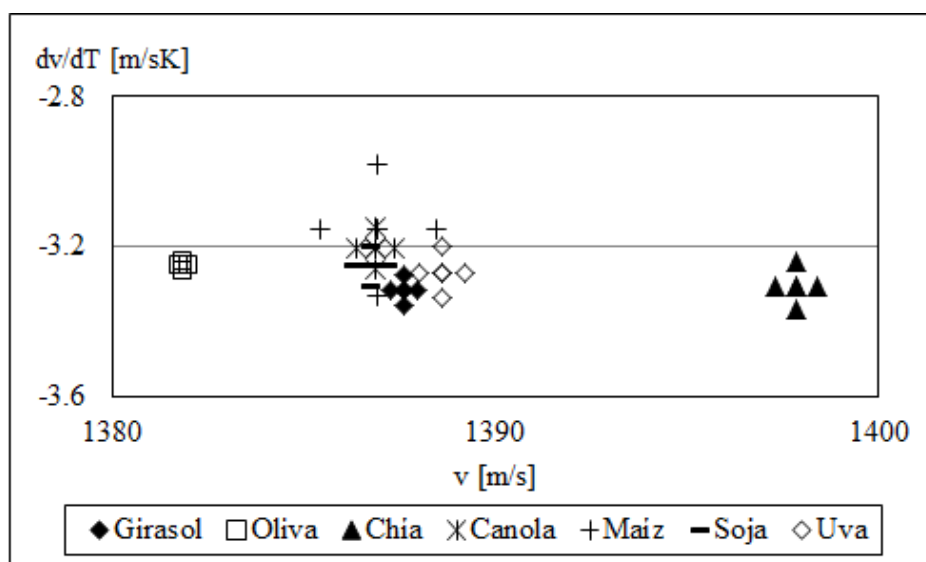


Figura VI.1.6 - Parámetros de ajuste de la velocidad del sonido ($v(T_o)$ y dv/dT) de los aceites vegetales.

A partir de la Tabla VI.1.5 y la Figura VI.1.6, se observa que los parámetros de ajuste de la velocidad del sonido de los de aceites vegetales están comprendidos en un intervalo muy estrecho de valores.

Los datos experimentales de biodiesel obtenidos de [21,22], fueron ajustados al modelo lineal de la Ec. A.7.1. En la Tabla VI.1.6 se muestran los parámetros de ajuste a la temperatura de referencia: $v(T_o)$ y dv/dT , sus incertezas ($\Delta v(T_o)$ y $\Delta dv/dT$), el coeficiente de determinación (R^2) y la incerteza RMS del ajuste ($\Delta v(T)$), de cada biodiesel. La temperatura de referencia es $T_o=318K$.

Origen	$v(T_o=318K)$ [ms^{-1}]	$\Delta v(T_o)$ [ms^{-1}]	dv/dT [$ms^{-1}K^{-1}$]	$\Delta(dv/dT)$ [$ms^{-1}K^{-1}$]	$\Delta v(T)$ [ms^{-1}]	R^2
Girasol	1322.2	0.3	-3.4	0.1	0.5	0.999
Oliva	1318.5	0.4	-3.5	0.1	0.7	0.999
Chía	1335.0	0.0	-3.5	0.1	0.1	0.999
Canola	1324.7	0.2	-3.4	0.1	0.4	0.999
Maiz	1324.7	0.3	-3.5	0.1	0.5	0.999
Soja	1326.0	0.6	-3.5	0.1	1.0	0.999
Uva	1326.8	0.2	-3.5	0.1	0.4	0.999

Tabla VI.1.6 - Parámetros de ajuste e incertezas de la velocidad del sonido de muestras de biodiesel.

La velocidad del sonido a la temperatura de referencia ($T_o=318K$), $v_o(T_o)$, de las muestras de biodiesel, toma valores entre $1335ms^{-1}$ (chía) y $1318ms^{-1}$ (oliva). El coeficiente de temperatura, dv/dT , toma valores entre $-3.4ms^{-1}K^{-1}$ (girasol) y $-3.5ms^{-1}K^{-1}$ (oliva).

A partir de la Tabla VI.1.6 puede verse que el modelo lineal propuesto (Ec. A.7.1) ajusta muy satisfactoriamente los datos experimentales. Cabe señalar que los valores medidos por el Ing. Martín Arolfo son compatibles con otros publicados en la literatura [11,12,13,14,15,16], dentro del error experimental.

En la Figura VI.1.7 se muestran los parámetros $v_o(T_o)$ y dv/dT de las muestras de biodiesel junto a sus incertezas.

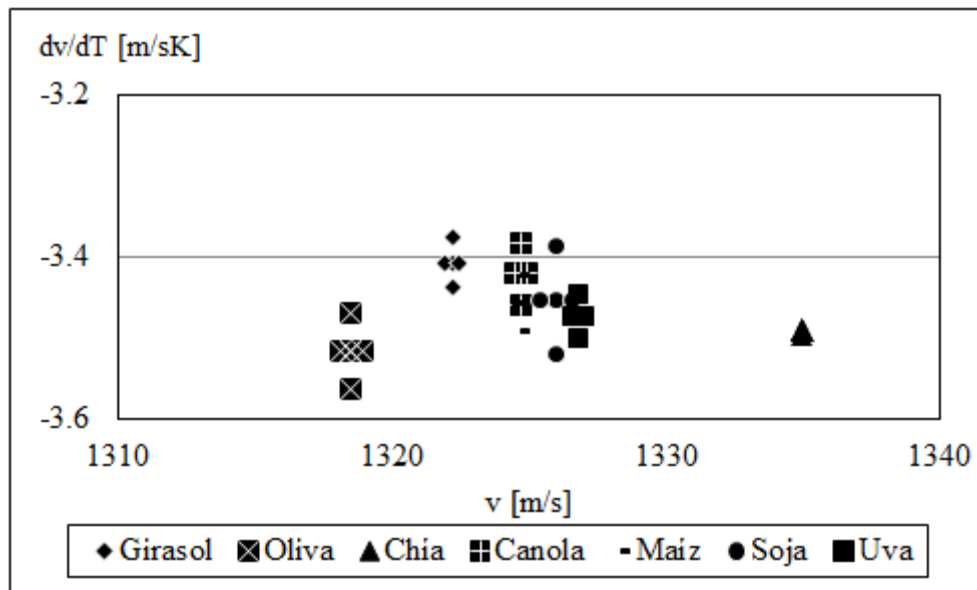


Figura VI.1.7 - Parámetros de ajuste de la velocidad del sonido ($v(T_o)$ y dv/dT) de las muestras de biodiesel.

En la Figura VI.1.7 se observa que los parámetros de ajuste de la velocidad del sonido de las muestras de biodiesel están comprendidos en un intervalo muy estrecho de valores.

En la Figura VI.1.8 se grafican los valores experimentales de la velocidad del sonido, v , en función de la temperatura para las muestras de aceite vegetal y biodiesel (símbolos).

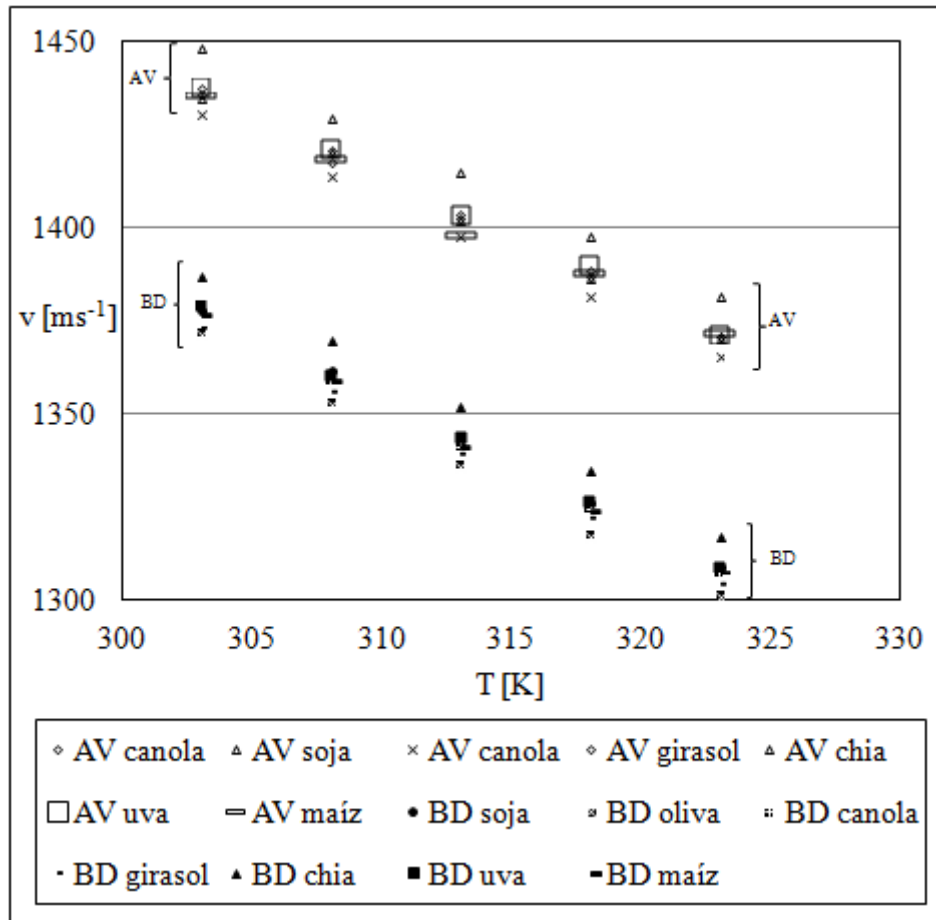


Figura VI.1.8 - Valores experimentales de la velocidad del sonido de las muestras de aceites vegetales (AV) y biodiesel (BD) en función de la temperatura.

A partir de la Figura VI.1.8 es claro que la velocidad del sonido de las muestras de aceites vegetales es mayor que las de biodiesel a todas las temperaturas de medición, independientemente de su origen.

En la Figura VI.1.9 se grafican los parámetros $v(T_o)$ y dv/dT de las muestras de aceites vegetales y biodiesel junto a sus incertezas.

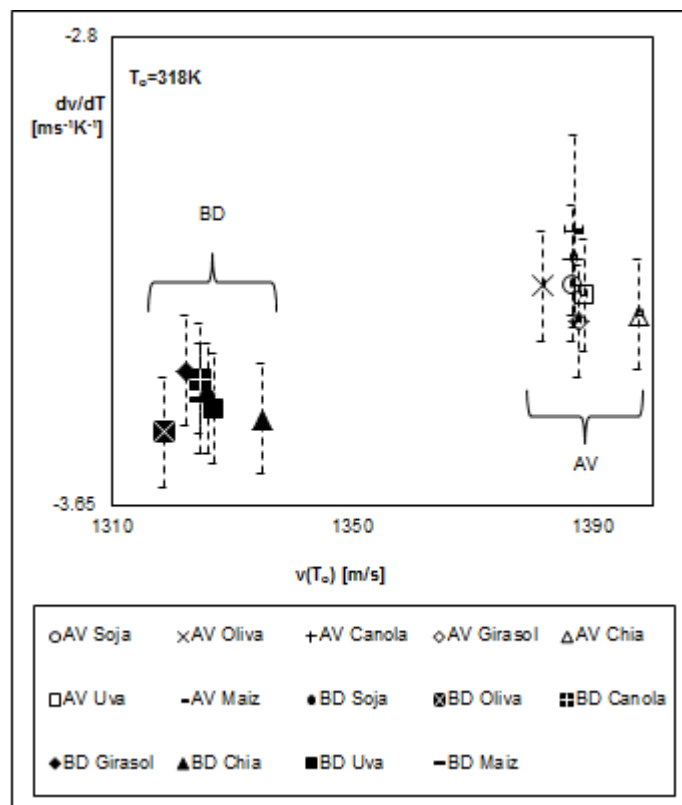


Figura VI.1.9 - Parámetros de ajuste de la velocidad del sonido ($v(T_o)$ y dv/dT) de muestras de aceites vegetales (AV) y biodiesel (BD).

A partir de la Figura VI.1.9 se observa que los valores de los parámetros de ajuste de la velocidad del sonido de los aceites vegetales y los biodiesel forman dos grupos bien definidos, independientemente del origen. Entonces, es posible afirmar que estos parámetros pueden ser utilizados para distinguir entre aceites vegetales y biodiesel, independientemente del origen. Además, los valores experimentales obtenidos [21,22], son una línea de base para la utilización de las propiedades acústicas en la determinación del grado de avance del proceso de transesterificación.

VI.1.4. CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y ACÚSTICAS

Según se mostró, tanto la permitividad, ϵ'_r , como la velocidad del sonido, v , de las muestras de aceites vegetales y biodiesel dependen linealmente de la temperatura (Ecs.

III.27 y Ec. A.7.1), dentro de los rangos estudiados en este trabajo. Luego, es posible escribir:

$$\varepsilon'_r(T) = \alpha + \beta v(T) \quad (\text{VI.1})$$

Para verificar esta correlación, se graficaron en la Figura VI.1.10 los valores de la permitividad relativa, ε'_r , y de la velocidad del sonido, v , a las temperaturas 303K, 313K y 323K, junto al ajuste de la Ec. VI.1 (líneas continuas) de los aceites vegetales y biodiesel de soja, oliva, uva y girasol. Los límites de las bandas de incerteza no se muestran en el gráfico ya que prácticamente se superponen con las líneas continuas.

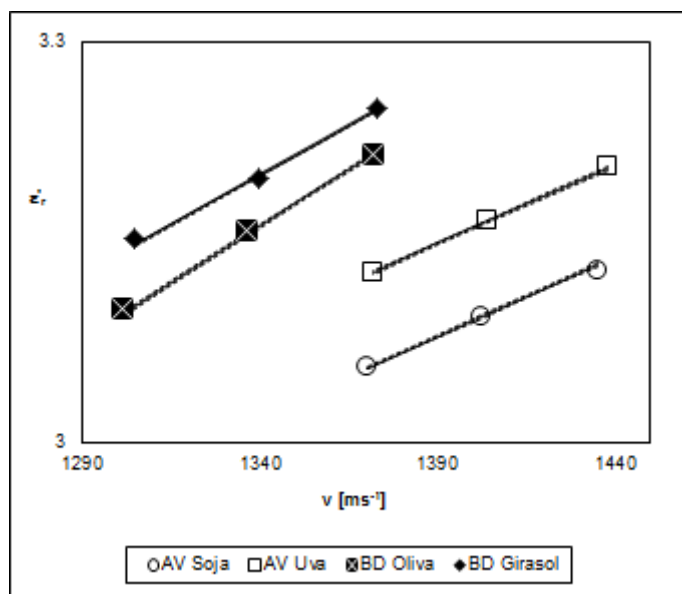


Figura VI.1.11 - Correlación entre la velocidad del sonido y la permitividad de muestras de aceites vegetales y biodiesel.

Puede verse que la correlación entre la permitividad y la velocidad del sonido dada por la Ec. VI.1 es muy satisfactoria en el rango de temperaturas estudiado. Este resultado es interesante para el desarrollo de sensores multiparamétricos y en sistemas de control. En la Figura VI.1.11 se muestran solamente los ajustes correspondientes a los aceites y biodiesel de soja, uva, oliva y girasol para mayor claridad. Sin embargo, cabe aclarar que todas las muestras presentan el mismo comportamiento.

En las Tablas VI.1.7 y VI.1.8 se muestran los parámetros de ajuste al modelo de la Ec. VI.1 de las muestras de aceite vegetal y biodiesel estudiados.

Aceite	α	$\Delta\alpha$	β [m^{-1}s]	$\Delta\beta$ [m^{-1}s]	$\Delta\varepsilon'_r$	R^2
Girasol	1.45	0.02	0.00119	0.00001	0.001	>0.999
Oliva	1.52	0.01	0.00112	0.00001	0.000	>0.999
Chia	1.36	0.03	0.00130	0.00002	0.001	0.999
Canola	1.47	0.03	0.00113	0.00002	0.001	0.999
Maiz	1.28	0.10	0.00131	0.00007	0.004	0.991
Soja	1.41	0.03	0.00120	0.00002	0.001	0.999
Uva	1.51	0.03	0.00118	0.00002	0.001	0.999

Tabla VI.1.7 - Parámetros de ajuste al modelo de la Ec. VI.1 de las muestras de aceite vegetal.

Biodiesel	α	$\Delta\alpha$	β [m^{-1}s]	$\Delta\beta$ [m^{-1}s]	$\Delta\varepsilon'_r$	R^2
Girasol	1.22	0.00	0.00147	0.00001	0.001	>0.999
Oliva	0.89	0.03	0.00169	0.00002	0.001	0.999
Chia	1.37	0.00	0.00141	0.00001	0.000	>0.999
Canola	1.46	0.02	0.00129	0.00001	0.001	>0.999
Maiz	1.13	0.02	0.00151	0.00002	0.001	>0.999
Soja	1.42	0.03	0.00128	0.00002	0.001	0.999
Uva	1.19	0.02	0.00149	0.00001	0.001	>0.999

Tabla VI.1.8 - Parámetros de ajuste al modelo de la Ec. VI.1 de las muestras de aceite vegetal.

A partir de los resultados presentados en las Tablas VI.1.7 y VI.1.8 se observa que el ajuste al modelo de la Ec. VI.1 es muy satisfactorio.

En resumen, el análisis de los resultados experimentales de las propiedades eléctricas y acústicas de las muestras de biodiesel y aceites vegetales estudiados, permite afirmar que ambas técnicas pueden utilizarse para discriminar entre aceites vegetales y biodiesel del mismo origen.

VI.2. PERMITIVIDAD Y VISCOSIDAD DE GASOIL

VI.2.1. PERMITIVIDAD

A partir de los datos experimentales de la Tabla V.2.1 y de la Figura V.2.1, se observa que la permitividad de todas las muestras de gasoil estudiadas decrece con la temperatura. Además, los datos experimentales de todas las muestras están contenidos en una franja de valores muy estrecha.

En la Tabla VI.2.1 se listan los valores de los parámetros del ajuste al modelo de la Ec. III.27 de las muestras de gasoil, $\varepsilon'_r(T_o)$ y $d\varepsilon'_r/dT$, sus incertezas, $\Delta\varepsilon'_r(T_o)$ y $\Delta d\varepsilon'_r/dT$, la incerteza RMS del ajuste, $\Delta\varepsilon'_r$, y el coeficiente de determinación, R^2 . La temperatura de referencia es $T_o=318K$.

Muestra	$\varepsilon'_r(T_o)$	$\Delta\varepsilon'_r(T_o)$	$d\varepsilon'_r/dT$	$\Delta d\varepsilon'_r/dT$	$\Delta\varepsilon'_r(T)$	R^2
YPF 10 ppm sin aditivos	2.053	0.005	-0.0051	0.0004	0.008	0.988
YPF 500 ppm sin aditivos	2.079	0.004	-0.0045	0.0003	0.005	0.993
YPF 1500 ppm sin aditivos	2.105	0.002	-0.0050	0.0001	0.002	0.999
YPF 10 ppm con aditivos	2.017	0.004	-0.0069	0.0003	0.005	0.993
YPF 500 ppm con aditivos	2.135	0.003	-0.0032	0.0002	0.004	0.989
Shell 10 ppm con aditivos	2.030	0.004	-0.0047	0.0003	0.006	0.992
Shell 500 ppm con aditivos	2.077	0.005	-0.0033	0.0004	0.007	0.974
Shell 1500 ppm con aditivos	2.037	0.011	-0.0045	0.0008	0.016	0.991

Tabla VI.2.1 - Parámetros de ajuste de la permitividad ($\varepsilon'_r(T_o)$ y $d\varepsilon'_r/dT$) de las muestras de gasoil y sus incertezas.

A partir de la Tabla VI.2.1 se observa que el ajuste al modelo de la Ec. III.27 es muy satisfactorio en todos los casos, y los valores de los parámetros de ajuste son muy próximos entre sí. Por otro lado, no se observan diferencias significativas entre las muestras con y sin aditivos, de distintas calidades, ni entre muestras de las marcas estudiadas.

La parte imaginaria de la permitividad relativa fue despreciable en todos los casos en el rango de frecuencias medido, por lo que no se reportan resultados de la conductividad eléctrica.

VI.2.2. VISCOSIDAD

En la Tabla VI.2.2 se listan los valores de los parámetros de ajuste de los datos experimentales de la viscosidad cinemática (Tabla V.4.2) al modelo de la Ec. A.7.2 del Anexo 7 para cada muestra de gasoil: A y E , sus incertezas, ΔA y ΔE , la incerteza RMS del ajuste, $\Delta\eta$, y el coeficiente de determinación, R^2 .

Muestra	A [mm ² s ⁻¹]	ΔA [mm ² s ⁻¹]	E_a [eV]	ΔE_a [eV]	$\Delta\eta$ [mm ² s ⁻¹]	R^2
YPF 10 ppm con aditivos	0.0049	0.0006	0.165	0.003	0.006	0.999
YPF 500 ppm con aditivos	0.0026	0.0002	0.194	0.003	0.004	>0.999
YPF 1500 ppm con aditivos	0.0024	0.0003	0.197	0.003	0.006	0.999

Tabla VI.2.2 - Parámetros de ajuste de la viscosidad cinemática al modelo de la Ec. V.2 de las muestras de gasoil a la temperatura de referencia y sus incertezas.

A partir de la Tabla VI.2.2, se observa que la Ec. A.7.2 ajusta muy satisfactoriamente los valores experimentales de la viscosidad cinemática de todas las muestras de gasoil estudiadas ($R^2 > 0.999$). Los valores de los parámetros de ajuste, A y E_a , varían entre las distintas muestras, siendo muy próximos al comparar las muestras de 500ppm y 1500ppm de azufre.

VI.3. ESTUDIO DE MEZCLAS DE BIODIESEL INDUSTRIAL DE SOJA Y GASOIL. ESTIMACIÓN DE LA PERMITIVIDAD Y LA COMPOSICIÓN.

En esta sección se presenta un modelo simple en función de la temperatura y la composición, que permite estimar la permitividad de las mezclas biodiesel/gasoil a partir de los datos experimentales presentados en la sección V.4. La incerteza relativa (RMS) de la estimación del modelo es del 1.2%. Además, se propone un modelo para estimar la composición de mezclas biodiesel/gasoil a partir de mediciones de permitividad y temperatura, con una incerteza absoluta (RMS) menor a 2.5%.

Los resultados de esta sección se incluyen en dos publicaciones internacionales con referato [23,24].

VI.3.1. ANTECEDENTES

El gasoil es utilizado extensamente en aplicaciones automotrices desde hace muchos años. En las últimas dos décadas, el uso de biodiesel como combustible alternativo renovable, ya sea puro o en mezclas con gasoil [10,18,25,26], ha crecido rápidamente alrededor del mundo debido a cuestiones de cuidado ambiental, como la reducción de las emisiones de dióxido de carbono.

La determinación de la composición de mezclas biodiesel/gasoil es muy importante por motivos legales y comerciales, además de técnicos [17,27]. Los motivos legales y comerciales incluyen la verificación del contenido de biodiesel, ya que muchos países regulan la cantidad de biodiesel con la que debe mezclarse el gasoil para su comercialización (en general hasta el 20%) [10,18]. Además, la composición de la mezcla afecta la performance del motor y sus emisiones [18,28]. El contenido de biodiesel se determina a partir de métodos estándar [29], los cuales resultan costosos, consumen tiempo, requieren personal entrenado y no son fácilmente adaptables a mediciones en tiempo real [8,9,18,27,30,31,32,33,34]. Estos métodos tampoco son aptos para mediciones *in situ*, por ejemplo durante el transporte y almacenamiento de combustible. En consecuencia, hay un interés renovado en el desarrollo de técnicas de bajo costo, rápidas y precisas para la caracterización de combustibles líquidos, que pueden ser adaptadas a plantas de producción de pequeña escala, y mediciones en campo y puntos de la cadena de distribución, particularmente en mercados emergentes

[1,2,3,4,5,7,8,9,10,18,20,27]. Las propiedades eléctricas y ultrasónicas son prometedoras en esa dirección.

Si bien en la literatura se reportan algunos valores de permitividad de gasoil [7,20], es interesante notar que, en general, la dependencia con la temperatura no es explicitada. Debe remarcarse que el desarrollo de las técnicas de caracterización dieléctrica de mezclas biodiesel/gasoil requiere mediciones precisas y un cuidadoso estudio de la dependencia de la permitividad con la temperatura.

En [6] se aplicó un sensor dieléctrico comercial para la estimación de la composición de mezclas biodiesel/gasoil (B0 hasta B100). El sensor había sido originalmente diseñado para ser utilizado en mezclas metanol/nafta y operaba a temperatura ambiente (296K). La incerteza en la determinación de la composición fue $\pm 10\%$. Cabe señalar que los valores de la permitividad de las muestras no se reportaron en dicho trabajo.

En [7] se describió un sensor específicamente diseñado para la determinación de la composición de mezclas biodiesel/gasoil (B0 a B100) en aplicaciones automotrices. Se reportaron gráficos de permitividad a temperaturas de 278K, 303K y 323K, a una frecuencia de 1kHz. El sensor fue exitosamente testado en un auto de pasajeros cubriendo más de 50000km a lo largo de una ruta. La incerteza de la estimación de la composición de las mezclas fue de $\pm 10\%$. El algoritmo utilizado para estimar la composición de la mezcla no fue indicado en dicha publicación.

En esta sección se proponen modelos para la estimación de la permitividad y el contenido de biodiesel en todo el rango de composición y a temperaturas entre 298K y 333K, con incertezas del orden del 1% y 2%, respectivamente.

VI.3.2. PERMITIVIDAD DE MEZCLAS BIODIESEL/GASOIL

En la Figura VI.4.1 se muestran los valores de la permitividad en función de la temperatura de todas las mezclas biodiesel/gasoil estudiadas (proyección sobre el plano (ϵ_r', T)). Los símbolos corresponden a las diferentes composiciones y las líneas continuas representan los ajustes dados por la Ec. III.27, correspondientes a cada muestra.

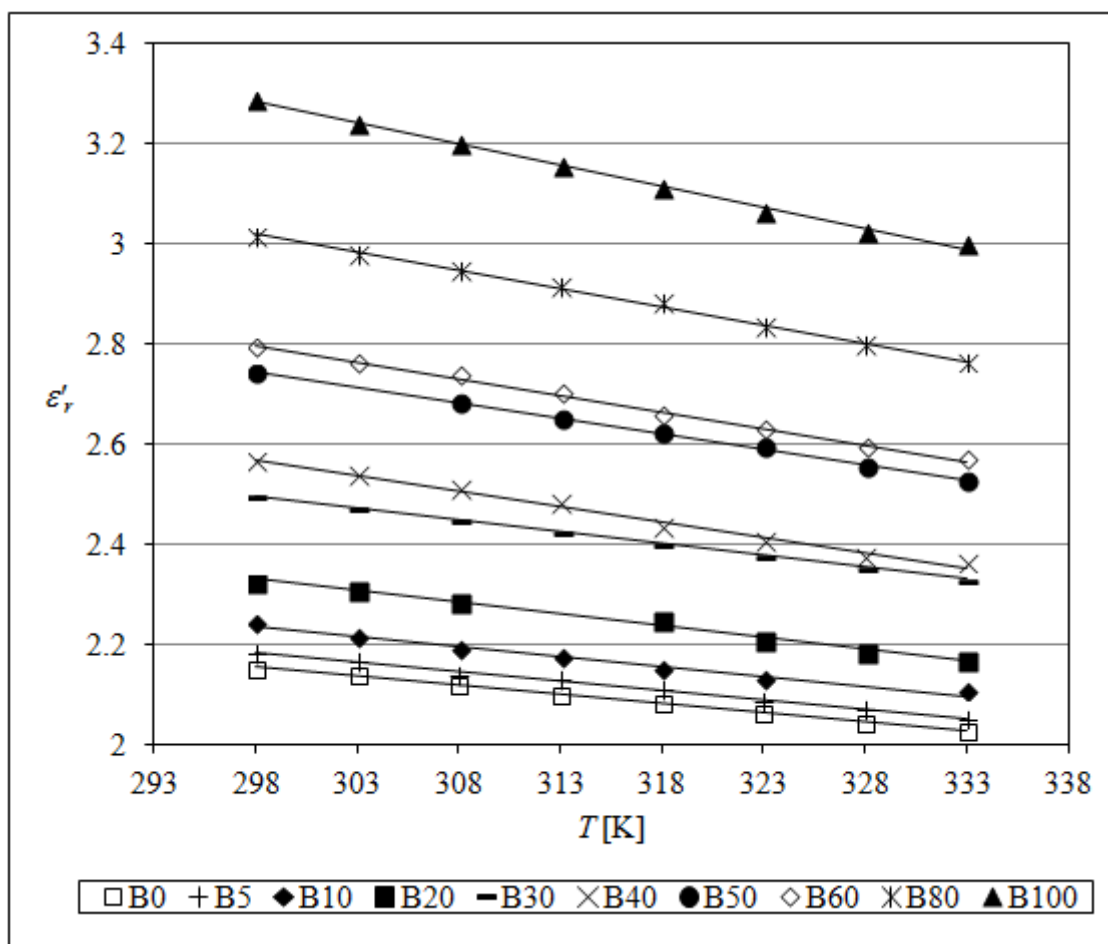


Figura VI.4.1 - Valores de la permitividad (símbolos) en función de la temperatura y ajustes de la Ec. III.27.

Se observa en la Figura VI.4.1 que, como en el caso del biodiesel puro [10,20,25] y los aceites vegetales [10,35], la permitividad del gasoil puro (B0) y de las mezclas biodiesel/gasoil decrece linealmente con la temperatura en todas las composiciones. Además, a una temperatura dada, la permitividad aumenta con el contenido de biodiesel, Bx

En la Tabla VI.4.1 se muestran los valores de los parámetros de ajuste de la Ec. III.27 de todas las mezclas biodiesel/gasoil estudiadas en este trabajo. Los valores de $\varepsilon'_r(T_o)$ y $\delta\varepsilon'_r/\delta T$ están dados junto a sus incertezas, $\Delta\varepsilon'_r(T_o)$ y $\Delta\delta\varepsilon'_r/\delta T$. La incerteza RMS del ajuste, $\Delta\varepsilon'_r$, y el coeficiente de determinación, R^2 , también están listados. La temperatura de referencia es $T_o=318K$.

Muestra	$\varepsilon'_r(T_o)$	$\Delta\varepsilon'_r(T_o)$	$\delta\varepsilon'_r/\delta T$ [K] ⁻¹	$\Delta\delta\varepsilon'_r/\delta T$ [K] ⁻¹	$\Delta\varepsilon'_r$	R^2
B0	2.082	0.001	-0.0037	0.0001	0.003	0.997
B5	2.108	0.001	-0.0037	0.0001	0.004	0.993
B10	2.155	0.003	-0.0039	0.0003	0.007	0.979
B20	2.237	0.003	-0.0046	0.0002	0.007	0.990
B30	2.402	0.003	-0.0048	0.0000	0.007	1.000
B40	2.443	0.003	-0.0062	0.0003	0.008	0.990
B50	2.621	0.001	-0.0062	0.0001	0.004	0.998
B60	2.664	0.002	-0.0066	0.0002	0.006	0.996
B80	2.875	0.002	-0.0072	0.0002	0.006	0.997
B100	3.116	0.002	-0.0084	0.0002	0.006	0.997

Tabla VI.4.1 - Valores de los parámetros de ajuste de las mezclas biodiesel/gasoil a la Ec. III.27.

A partir de la Tabla VI.4.1 se observa que el modelo de la Ec. III.27 es válido en el rango completo de composición de mezclas biodiesel/gasoil. Por otro lado, tanto $\varepsilon'_r(T_o)$ como el módulo de la pendiente ($\delta\varepsilon'_r/\delta T$) crecen con el contenido de biodiesel, Bx . Esto era de esperarse ya que el biodiesel es una sustancia más polar que el gasoil [10,36].

A fin de observar más en detalle los ajustes de la Ec. III.27, en la Figura VI.4.2 se muestran las curvas correspondientes a B0 y B20. Las líneas continuas corresponden al modelo de la Ec. III.27 y los límites de las bandas de incerteza (un desvío estándar) están indicados con líneas punteadas.

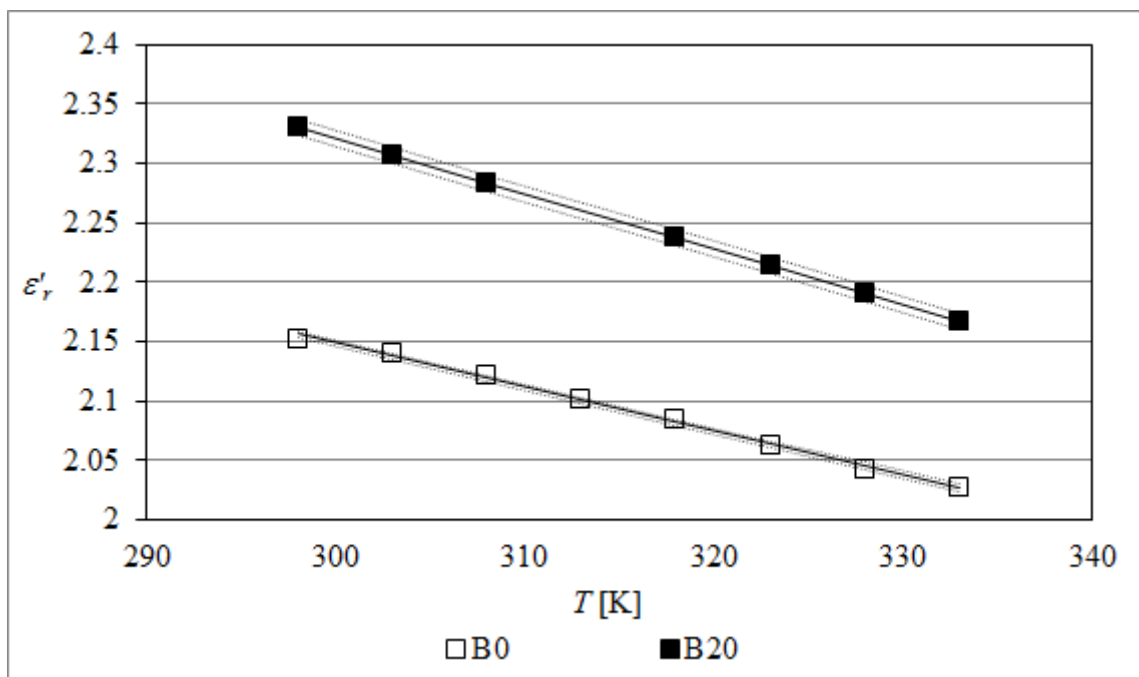


Figura VI.4.2 - Permitividad relativa en función de la temperatura de las muestras B0 y B20. Símbolos: datos experimentales. Líneas continuas: ajustes de la Ec. III.27.

Cabe señalar que en el caso de la muestra de gasoil puro, B0, las bandas de incerteza son tan angostas que sus límites no pueden distinguirse de la línea continua de la Figura VI.4.2.

VI.3.3. ESTIMACIÓN DE LA PERMITIVIDAD DE MEZCLAS BIODIESEL/GASOIL

En la Figura VI.4.3 se muestran los valores de la permitividad en función del contenido de biodiesel, a temperaturas de medición entre 298K y 333K. Las series de datos correspondientes a las temperaturas intermedias no se grafican para mayor claridad de la figura.

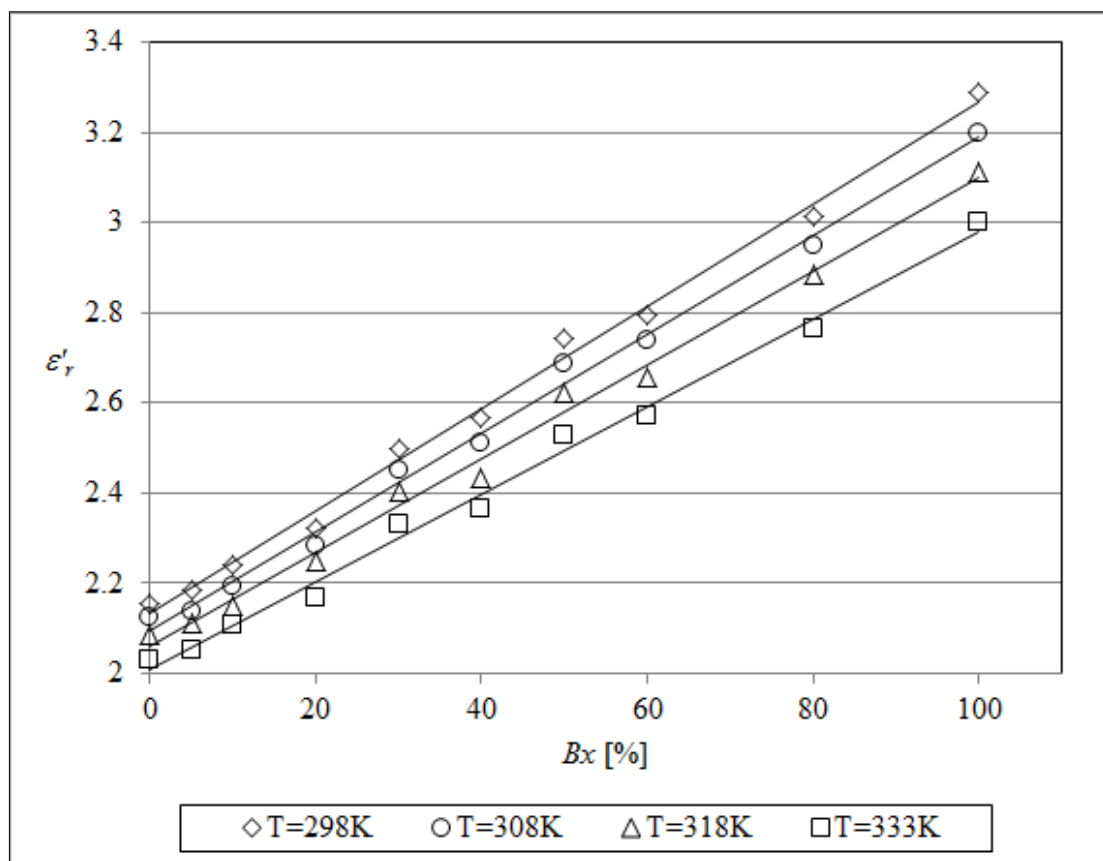


Figura VI.4.3 - Permitividad relativa en función del contenido de biodiesel.

En la Figura VI.4.3 se observa que la permitividad de las mezclas biodiesel/gasoil aumenta con el contenido de biodiesel, como ya se había notado a partir de una observación cuidadosa de la Tabla VI.4.1.

Para cada una de las temperaturas de medición se propone un ajuste lineal con el contenido de biodiesel, Bx ,

$$\epsilon'_r(Bx, T) = \epsilon'_r(B0, T) + \frac{\delta \epsilon'_r}{\delta Bx} Bx \quad (VI.4.1)$$

donde $\epsilon'_r(B0, T)$ es el valor de la permitividad del gasoil puro a la temperatura de medición, y $\frac{\delta \epsilon'_r}{\delta T}$ está evaluada a la temperatura de medición y a la composición B0 (gasoil puro), y su unidad es $\%^{-1}$.

Los parámetros de ajuste de la Ec. VI.4.1, $\varepsilon'_r(B0)$ y $\delta\varepsilon'_r/\delta Bx$, están listados en la Tabla VI.4.2 para cada temperatura de medición, junto a las incertezas, $\Delta\varepsilon'_r(B0)$ y $\Delta\delta\varepsilon'_r/\delta Bx$, la incerteza RMS del ajuste, $\Delta\varepsilon'_r$, y el coeficiente de determinación, R^2 .

Temperatura [K]	$\varepsilon'_r(B0)$	$\Delta(\varepsilon'_r(B0))$	$\delta\varepsilon'_r/\delta Bx$ $\times 10^{-2} [\%]^{-1}$	$\Delta(\delta\varepsilon'_r/\delta Bx)$ $\times 10^{-2} [\%]^{-1}$	$\Delta\varepsilon'_r$	R^2
298	2.13	0.01	1.138	0.003	0.03	0.995
303	2.11	0.01	1.104	0.002	0.02	0.997
308	2.09	0.01	1.094	0.003	0.03	0.995
313	2.08	0.01	1.061	0.002	0.02	0.996
318	2.06	0.01	1.040	0.003	0.03	0.994
323	2.04	0.02	1.015	0.003	0.03	0.993
328	2.02	0.02	0.988	0.003	0.03	0.992
333	2.01	0.01	0.972	0.003	0.03	0.993

Tabla VI.4.2 - Parámetros de ajuste de la Ec. VI.4.1.

A partir de la Tabla VI.4.2 puede verse que, en todos los casos, el modelo lineal de la Ec. VI.4.1 ajusta muy satisfactoriamente los resultados experimentales ($R^2 > 0.992$), con una incerteza de la estimación de ε'_r menor al 2% en todos los casos.

A modo de ejemplo, en la Figura VI.4.4 se muestra en más detalle el ajuste de los valores de ε'_r (símbolos) al modelo de la Ec. VI.4.1, correspondiente a la temperatura de 308K. La línea continua indica el ajuste de la Ec. VI.4.1 y las líneas punteadas indican los límites de la bandas de incerteza (un desvío estándar).

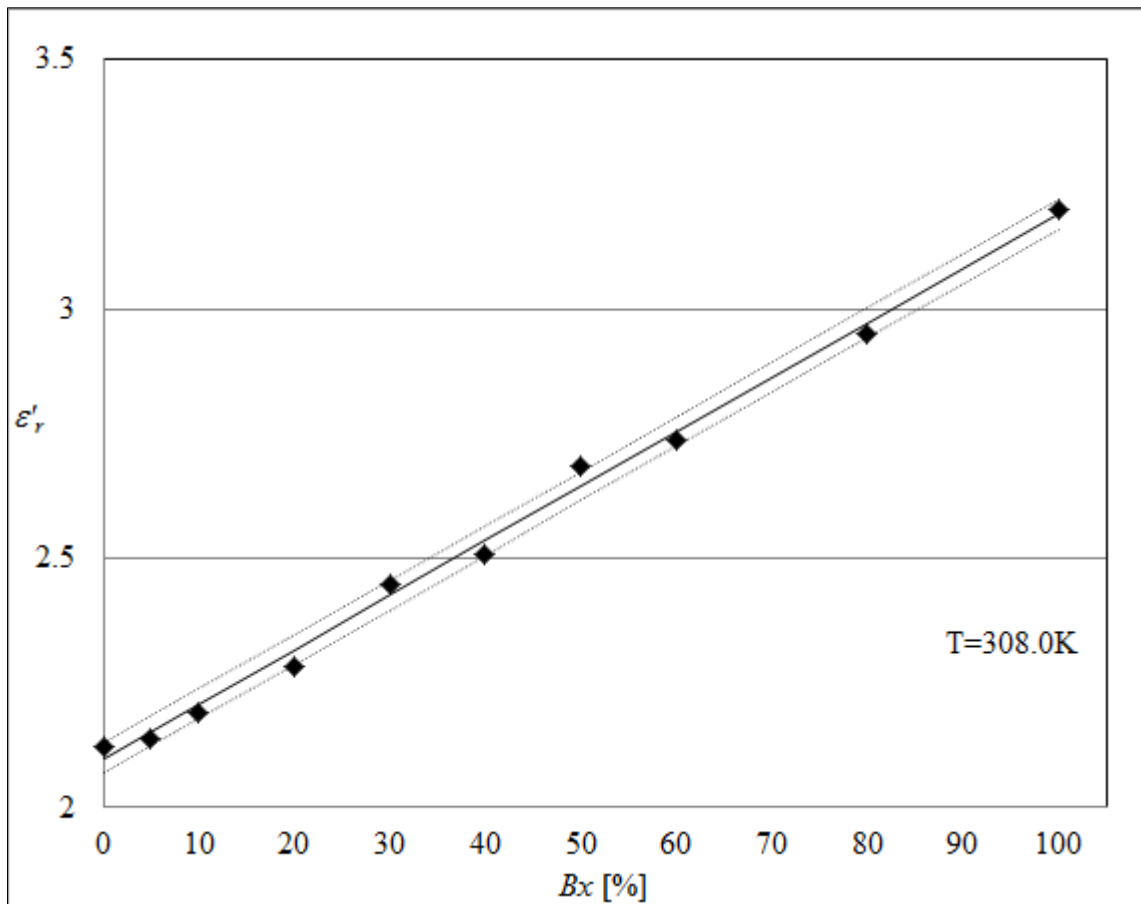


Figura VI.4.4 - Permitividad relativa en función del contenido de biodiesel a $T=308K$.

A fin de obtener una expresión aplicable a cualquier composición y temperatura, resulta de interés estudiar la dependencia de $\delta\epsilon'_r/\delta Bx$ con la temperatura.

En la Figura VI.4.5 se grafican los valores de $\delta\epsilon'_r/\delta Bx$ (símbolos) obtenidos de la Tabla VI.4.2, en función de la temperatura de medición.

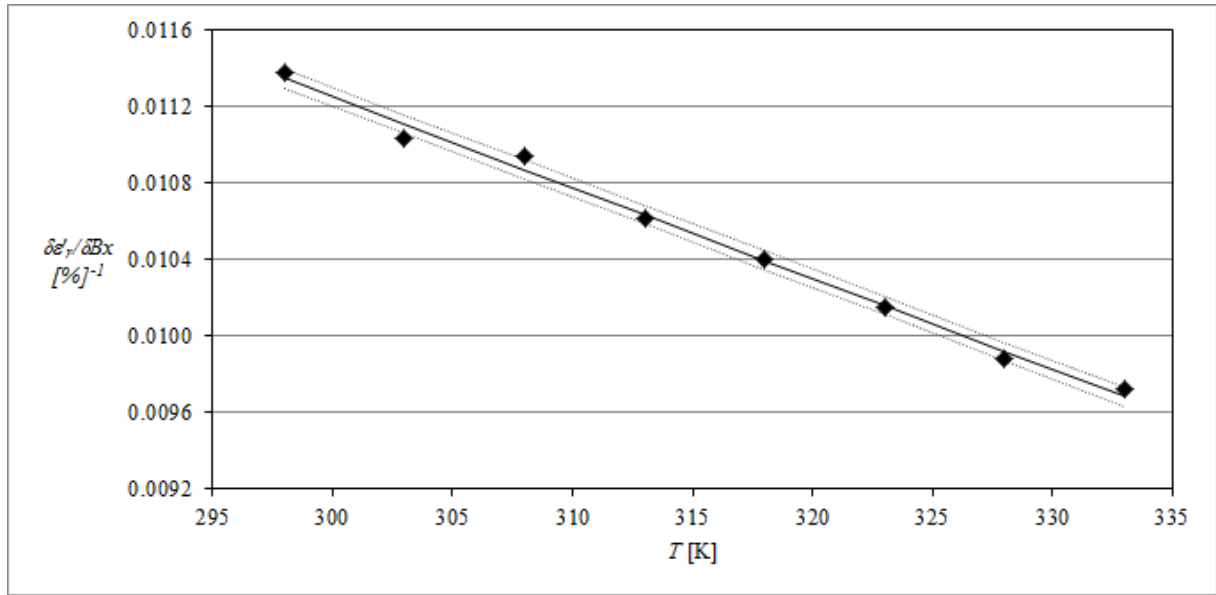


Figura VI.4.5 - $\delta \epsilon'_r(T)/\delta Bx$ en función de la temperatura de la muestra, T .

Según se observa en la Figura VI.4.5, es posible plantear una dependencia lineal entre $\delta \epsilon'_r/\delta Bx$ y la temperatura:

$$\frac{\delta \epsilon'_r(T)}{\delta Bx} = \frac{\delta \epsilon'_r(T_o)}{\delta Bx} + \frac{\delta^2 \epsilon'_r}{\delta Bx \delta T} (T - T_o) \quad (\text{VI.4.2})$$

En la Tabla VI.4.3 se muestran los resultados del ajuste de $\delta \epsilon'_r/\delta Bx$ a la Ec. VI.4.2, incluyendo los parámetros de ajuste, $\delta \epsilon'_r(T_o)/\delta Bx$ y $\delta^2 \epsilon'_r(T_o)/\delta Bx \delta T$. Las incertezas de los parámetros de ajuste, $\Delta \delta \epsilon'_r(T_o)/\delta Bx$ y $\Delta \delta^2 \epsilon'_r(T_o)/\delta Bx \delta T$, la incerteza RMS del ajuste, $\Delta \left(\frac{\delta \epsilon'_r(T)}{\delta Bx} \right)$, y el coeficiente de determinación, R^2 , también están listados en la Tabla VI.4.3.

$\delta \epsilon'_r(T_o)/\delta Bx$ [\$\%\$]\$^{-1}\$	$\Delta (\delta \epsilon'_r(T_o)/\delta Bx)$ [\$\%\$]\$^{-1}\$	$\delta^2 \epsilon'_r/\delta Bx \delta T$ [\$\%K\$]\$^{-1}\$	$\Delta (\delta^2 \epsilon'_r/\delta Bx \delta T)$ [\$\%K\$]\$^{-1}\$	$\Delta (\delta \epsilon'_r/\delta Bx)$ [\$\%\$]\$^{-1}\$	R^2
0.01040	0.00002	-5E-05	2E-06	5E-05	0.994

Tabla VI.4.3 - Parámetros de ajuste de la Ec. VI.4.2, incerteza RMS del ajuste y coeficiente de determinación, R^2 .

A partir de la Tabla VI.4.3 se puede ver que el ajuste de la Ec.VI.4.2 es muy satisfactorio.

Introduciendo la Ec. VI.4.2 en la Ec. VI.4.1, se obtiene la permitividad en función de la temperatura y de la composición

$$\varepsilon'_r(Bx, T) = \varepsilon'_r(B0, T_o) + \frac{\delta\varepsilon'_r(B0, T_o)}{\delta T} (T - T_o) + \left[\frac{\delta\varepsilon'_r(T_o)}{\delta Bx} + \frac{\delta^2\varepsilon'_r}{\delta Bx\delta T} (T - T_o) \right] Bx \quad (VI.4.3)$$

Cabe destacar que los cuatro parámetros de la Ec.VI.4.3 ($\varepsilon'_r(B0, T_o)$, $\frac{\delta\varepsilon'_r(B0, T_o)}{\delta T}$, $\frac{\delta\varepsilon'_r(T_o)}{\delta Bx}$ y $\frac{\delta^2\varepsilon'_r}{\delta Bx\delta T}$) pueden obtenerse a partir de la permitividad del gasoil y el biodiesel. El caso de $\varepsilon'_r(B0, T_o)$ y $\frac{\delta\varepsilon'_r(B0, T_o)}{\delta T}$ es inmediato, ya que son los dos parámetros de ajuste de la Ec. III.27 de la permitividad del gasoil. Los parámetros $\frac{\delta\varepsilon'_r(T_o)}{\delta Bx}$ y $\frac{\delta^2\varepsilon'_r}{\delta Bx\delta T}$ pueden estimarse como

$$\frac{\delta\varepsilon'_r(T_o)}{\delta Bx} = \frac{\varepsilon'_r(B100, T_o) - \varepsilon'_r(B0, T_o)}{100} \quad (VI.4.4)$$

y

$$\frac{\delta^2\varepsilon'_r}{\delta Bx\delta T} = \frac{\frac{\delta\varepsilon'_r(T_o)}{\delta Bx}}{333K - 298K} \quad (VI.4.5)$$

Agrupando los términos de la Ec. VI.4.3, la misma puede escribirse de forma más compacta como

$$\varepsilon'_r(Bx, T) = a + bT + cBx + dTBx \quad (VI.4.6)$$

donde

$$a = \varepsilon'_r(B0, T_o) - \frac{\delta\varepsilon'_r(B0, T_o)}{\delta T} T_o \quad (VI.4.7)$$

$$b = \frac{\delta \varepsilon'_r(B0, T_0)}{\delta T} \quad (\text{VI.4.8})$$

$$c = \frac{\delta \varepsilon'_r(T_0)}{\delta Bx} - \frac{\delta^2 \varepsilon'_r}{\delta Bx \delta T} T_0 \quad (\text{VI.4.9})$$

$$d = \frac{\delta^2 \varepsilon'_r}{\delta Bx \delta T} \quad (\text{VI.4.10})$$

Los coeficientes a , b , c y d de la Ec. VI.4.6 fueron determinados en forma independiente a partir de una regresión multivariable utilizando todos los datos experimentales. En la Tabla VI.4.4 se muestran los valores de los parámetros de la Ec. VI.4.6 así obtenidos, junto a la incerteza RMS del ajuste de la permitividad, $\Delta \varepsilon'_r$.

a	$b [K]^{-1}$	$c [\%]^{-1}$	$d [\%K]^{-1}$	$\Delta \varepsilon'_r$
3.329	-0.0040	0.025	-0.000045	0.03

Tabla VI.4.4 - Parámetros de ajuste de la Ec. VI.4.6 e incerteza RMS de la estimación de la permitividad, $\Delta \varepsilon'_r$.

Los coeficientes de la Tabla VI.4.4 concuerdan muy bien con aquellos obtenidos utilizando las Ecs. VI.4.7 a VI.4.10, calculados a partir de los parámetros del biodiesel y del gasoil, listados en las Tablas VI.4.1, VI.4.2 y VI.4.3.

En la Figura VI.4.6 están graficados los valores de la permitividad (esferas negras) y los estimados a partir de la Ec. VI.4.6 (esferas blancas) en función de la temperatura, T , y de la composición, Bx .

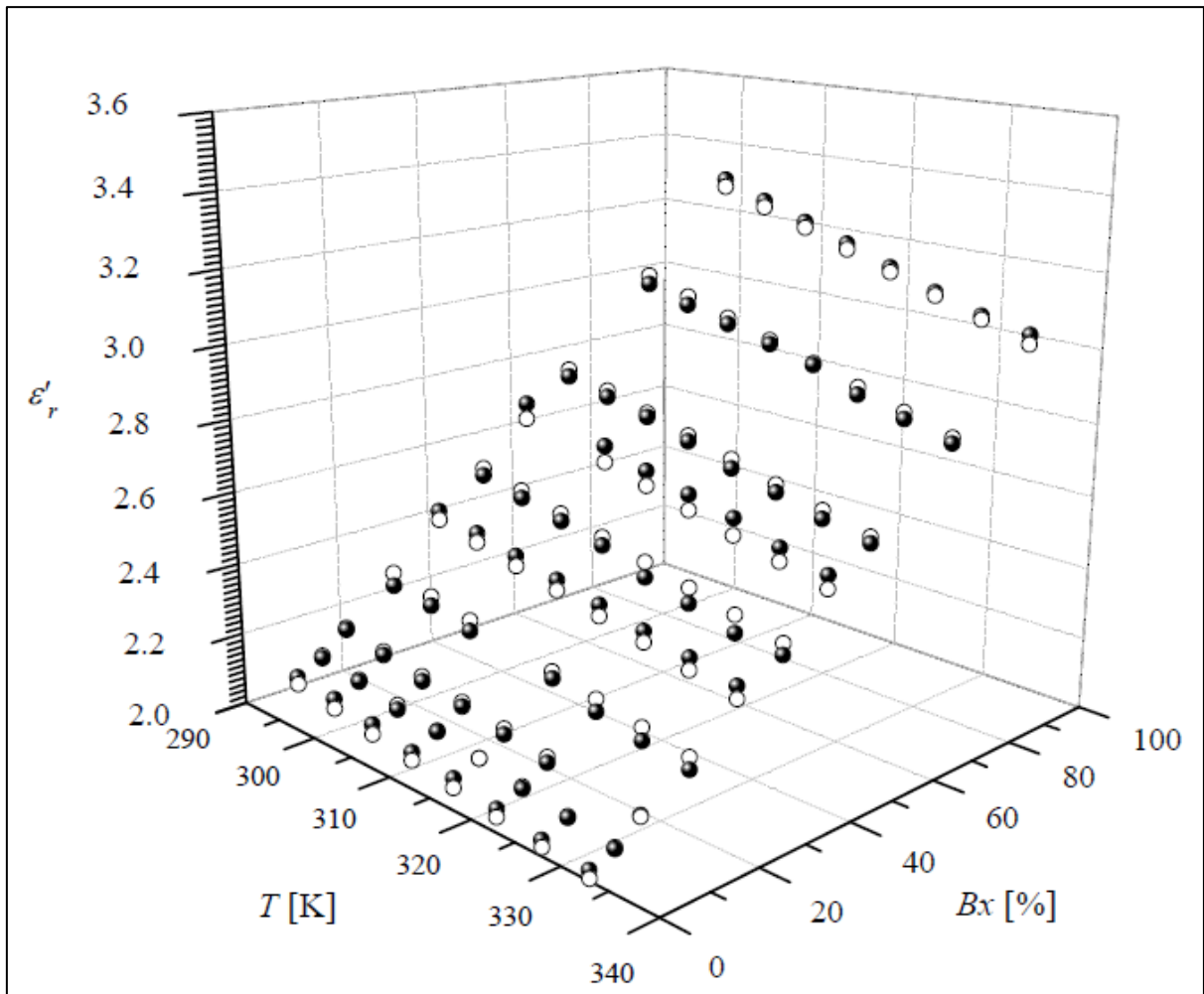


Figura VI.4.6 - Datos experimentales de la permitividad (esferas negras) y estimaciones a partir de la Ec. VI.4.6 (esferas blancas).

Según se observa en la Figura VI.4.6, la concordancia entre los valores de la permitividad y los valores estimados a través de la Ec. VI.4.6 es muy buena en todo el rango de temperatura y composición estudiado. Cabe señalar que el modelo fue obtenido a partir del análisis sistemático de los datos experimentales.

Los resultados presentados muestran que es posible estimar la permitividad de mezclas biodiesel/gasoil conociendo la composición y la temperatura, dentro de los rangos estudiados.

VI.3.4. ESTIMACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE MEZCLAS BIODIESEL/GASOIL

Como se indica al comienzo de esta sección, la estimación de la composición de mezclas biodiesel/gasoil reviste interés tecnológico [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,18,20,].

El hecho de que el modelo de la Ec. VI.4.6 ajuste satisfactoriamente los valores experimentales, sugiere la posibilidad de utilizar el siguiente modelo para estimar el contenido de biodiesel a partir de mediciones de permitividad y temperatura,

$$B_x(\varepsilon'_r, T) = \frac{\varepsilon'_r - a' - b'T}{c' + d'T} \quad (\text{VI.4.11})$$

Los parámetros de la Ec. VI.4.11 fueron determinados a partir de una regresión no lineal multivariable utilizando todos los datos experimentales. La Tabla VI.4.5 muestra los valores de los parámetros así obtenidos y la incerteza RMS de la estimación de la composición, ΔB_x .

$a' [\%]$	$b' [K]^{-1}$	$c' [\%]^{-1}$	$d' [\%K]^{-1}$	$\Delta B_x [\%]$
3.329	-0.0040	0.025	-0.000045	2.5

Tabla VI.4.5 - Parámetros de ajuste de la Ec. VI.4.11 e incerteza RMS de la estimación de la composición, ΔB_x .

Debe destacarse que los coeficientes de las Tablas VI.4.4 y VI.4.5 concuerdan muy bien entre sí. Además, el ajuste al modelo de la Ec. VI.4.11 es muy satisfactorio, siendo la incerteza RMS de la estimación del 2.5% en todo el rango de temperaturas y composiciones estudiado.

En la Figura VI.4.7 se grafica la composición de las muestras (triángulos negros) y la estimación de la composición dada por el modelo de la Ec. VI.4.11 (triángulos blancos) en función de la temperatura y de la permitividad.

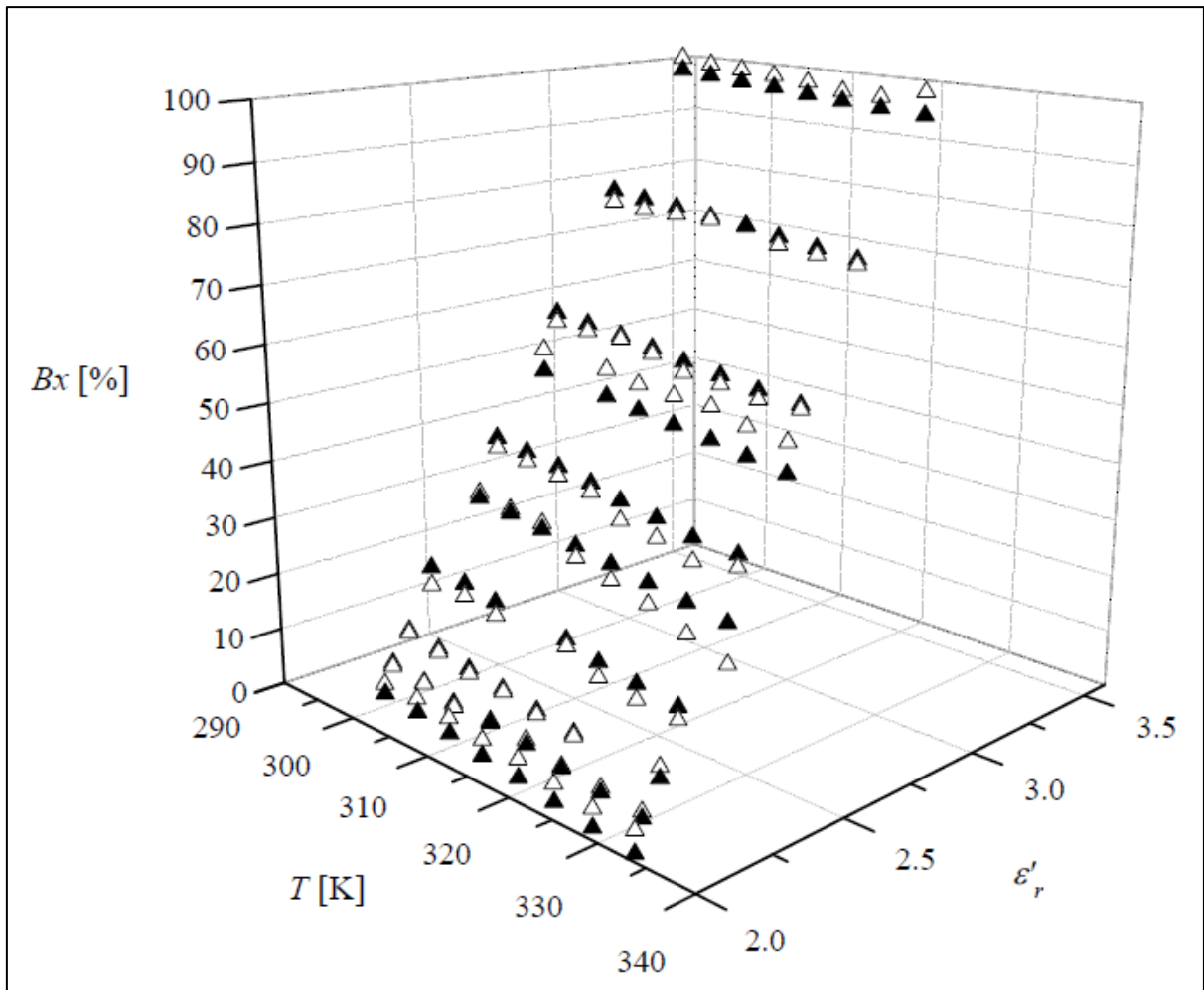


Figura VI.4.7 - Contenido de biodiesel (triángulos negros), Bx , y estimaciones a partir de la Ec. VI.4.11 (triángulos blancos).

Se observa en la Figura VI.4.7 que los datos experimentales y las estimaciones del modelo de la Ec. VI.4.11 concuerdan muy satisfactoriamente.

VI.3.5. VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS CON BODIESEL Y GASOIL DE DISTINTAS PROCEDENCIAS

Como se mencionó anteriormente, el biodiesel puede ser obtenido a partir de distintos aceites vegetales, dependiendo del país o región de producción [10,18,25]. Por otro lado, el gasoil puede tener diferentes aditivos, los cuales pueden variar entre distintas marcas, y además su contenido de azufre varía dependiendo de la calidad.

Resulta entonces sumamente interesante analizar la validez del modelo de la Ec. VI.4.6, utilizando los parámetros de ajuste de las permitividades de biodiesel de diferentes orígenes y de gasoil de distintas características. Para esto se utilizaron los resultados de las propiedades eléctricas de muestras de gasoil y biodiesel presentados en las secciones V.2 y V.3, respectivamente.

Los coeficientes a , b , c y d de la Ec. VI.4.6 se obtuvieron introduciendo los parámetros de ajuste de la Ec. III.27 ($\varepsilon_r'(T_o)$ y $d\varepsilon_r'/dT$) (listados en las Tablas VI.1.2 y VI.2.1), en las Ecs. VI.4.7 a VI.4.10. Con los coeficientes a , b , c y d así obtenidos, se estimó la permitividad de las mezclas biodiesel/gasoil en el rango completo de temperatura y composición. A partir de las estimaciones así obtenidas y de los datos experimentales presentados en la sección V.4, se calculó la incerteza RMS de cada estimación, la cual está indicada en la Tabla VI.4.6.

Gasoil	Biodiesel						
	Girasol	Oliva	Chia	Canola	Maiz	Soja	Uva
YPF 10 ppm sin aditivos	0.05	0.04	0.09	0.05	0.04	0.04	0.05
YPF 500 ppm sin aditivos	0.05	0.04	0.09	0.05	0.04	0.04	0.05
YPF 1500 ppm sin aditivos	0.06	0.05	0.10	0.06	0.05	0.05	0.06
YPF 10 ppm con aditivos	0.05	0.04	0.08	0.05	0.04	0.04	0.05
YPF 500 ppm con aditivos	0.05	0.03	0.07	0.05	0.05	0.04	0.05
Shell 10 ppm con aditivos	0.04	0.03	0.08	0.04	0.04	0.04	0.04
Shell 500 ppm con aditivos	0.05	0.04	0.09	0.05	0.04	0.04	0.05
Shell 1500 ppm con aditivos	0.04	0.03	0.08	0.04	0.03	0.04	0.04

Tabla VI.4.6 - Incerteza RMS de la estimación de la permitividad (Ec. VI.4.6) utilizando los parámetros $\varepsilon_r'(T_o)$ y $d\varepsilon_r'/dT$ listados en las Tablas VI.1.2 y VI.2.1 y las Ecs. VI.4.7 a VI.4.10.

Puede observarse que en todos los casos el valor de la incerteza RMS de la estimación de la permitividad es muy satisfactorio (del orden del 1%). Estos resultados muestran que el modelo de la Ec. VI.4.6 no depende del origen del biodiesel, ni del tipo de gasoil.

VI.3.6. APLICACIÓN DEL MODELO A MUESTRAS DE GASOIL COMERCIALES

Como se menciona en el capítulo 1, el corte mínimo establecido en la legislación actual argentina es del 10% (V/V) [26]. A fin de verificar el modelo de la Ec. VI.4.6, se midió la permitividad a temperaturas entre 298K y 333K, de dos muestras de gasoil adquiridas en estaciones de servicio de CABA de dos compañías: (Marca 1: Shell, Marca 2: Petrobras), y se compararon los mismos con las estimaciones del modelo de la Ec. VI.4.6. Los resultados experimentales se muestran en la Tabla VI.4.7.

Muestra	ϵ'_r							
	298K	303K	308K	313K	318K	323K	328K	333K
Marca 1	2.261	2.239	2.220	2.198	2.151	2.131	2.119	2.113
Marca 2	2.257	2.242	2.228	2.187	2.157	2.144	2.126	2.124

Tabla VI.4.7 - Valores de la permitividad de muestras comerciales de gasoil (B10) en función de la temperatura.

En las Figuras VI.4.8 y VI.4.9 se grafican los valores de la permitividad de las muestras comerciales de gasoil (círculos negros) y las estimaciones de la Ec. VI.4.6 junto a su incerteza. Para realizar las estimaciones se consideró que el contenido de biodiesel es del 10%.

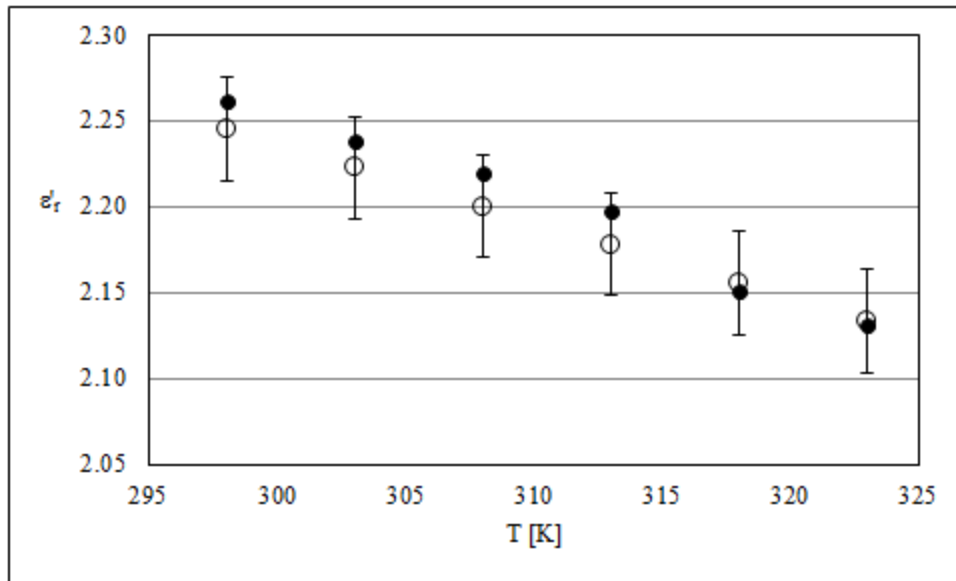


Figura VI.4.8 - Permitividad de la muestra 1 (círculos negros) y estimación de la Ec. VI.4.6 (círculos blancos).

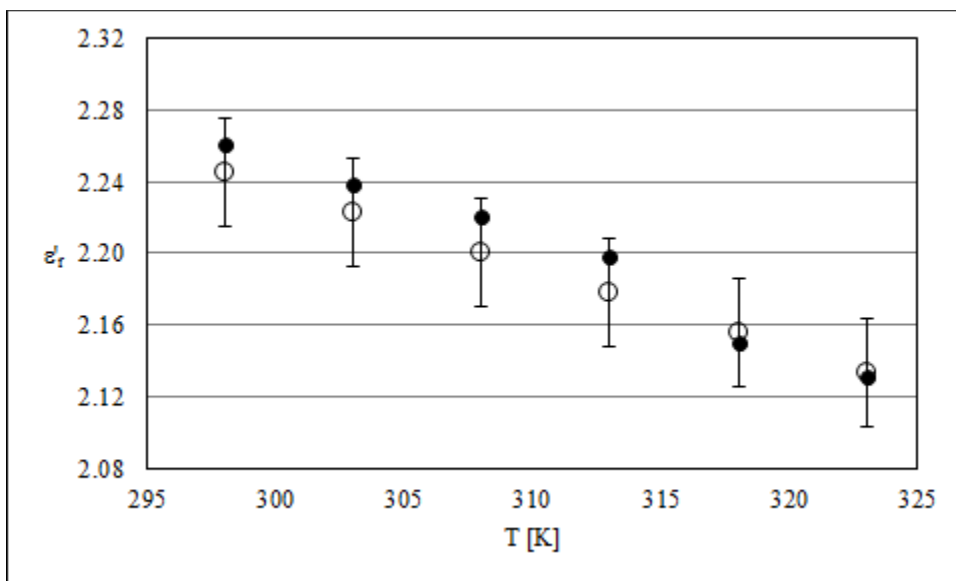


Figura VI.4.9 - Permitividad de la muestra 2 (círculos negros) y estimación de la Ec. VI.4.6 (círculos blancos).

A partir de las Figuras VI.4.8 y VI.4.9, se observa que en ambos casos la permitividad medida en las muestras y la estimada a partir del modelo de la Ec. IV.4.6 coinciden muy

satisfactoriamente. Estos resultados muestran que el modelo propuesto se puede aplicar para verificar el contenido de biodiesel a partir de mediciones de permitividad.

VI.5: VISCOSIDAD CINEMÁTICA DE BIODIESEL DE SOJA, GASOIL Y SUS MEZCLAS: ESTIMACIÓN A PARTIR DE LA PERMITIVIDAD Y LA TEMPERATURA

En esta sección se analizan los resultados experimentales de la viscosidad cinemática [37], reproducidos en la Tabla V.4.2, y la permitividad de biodiesel de soja, gasoil y sus mezclas, presentados en las secciones V.2 y V.4.

A partir del análisis, se propone un modelo para estimar la viscosidad cinemática de mezclas con composición desconocida a partir de valores de la permitividad y temperatura. El ajuste del modelo es muy satisfactorio, siendo su incerteza RMS menor a $0.02\text{mm}^2\text{s}^{-1}$ en todo el rango de composiciones y para todas las temperaturas estudiadas.

Los resultados presentados en esta sección se incluyen en una publicación internacional con referato [38].

VI.5.1. ANTECEDENTES

El conocimiento preciso de algunas propiedades físico químicas de las mezclas biodiesel/gasoil es muy importante para la optimización de la performance de un motor. En particular, la determinación de la viscosidad cinemática del combustible es importante para alcanzar una atomización correcta del mismo, permitiendo una combustión eficiente [18,39].

Los métodos estándar para la determinación de la viscosidad [40] son muy precisos pero requieren largos tiempos de medición y no son adaptables a sistemas de medición *online*. Por esto, el uso de métodos indirectos para la estimación de la viscosidad cinemática resulta de interés tecnológico [36,41].

La viscosidad cinemática de las mezclas biodiesel/gasoil depende fuertemente de la temperatura y de la composición. Si bien en la literatura pueden encontrarse numerosos modelos que permiten estimar la viscosidad con composición conocida en función de la temperatura [41,42,43,44], los modelos para estimar la composición son escasos [18,36]. Precisamente, en esta sección se establece una relación entre la viscosidad cinemática y los modelos de las Ecs. VI.4.6 y VI.4.11, que permite superar dicha dificultad.

VI.5.2. VISCOSIDAD CINEMÁTICA DE LAS MEZCLAS BIODIESEL/GASOIL

En la Figura VI.5.1 se indican mediante símbolos los valores experimentales de la viscosidad cinemática de cada mezcla, en función de la temperatura. Los mismos fueron obtenidos por la Ing. Martina Colman, integrante del GER [37]. Las curvas corresponden al ajuste de la Ec. A.4.2 (Anexo 7). Las bandas de incerteza son demasiado pequeñas en comparación con la escala de la figura, por lo que no fueron graficadas.

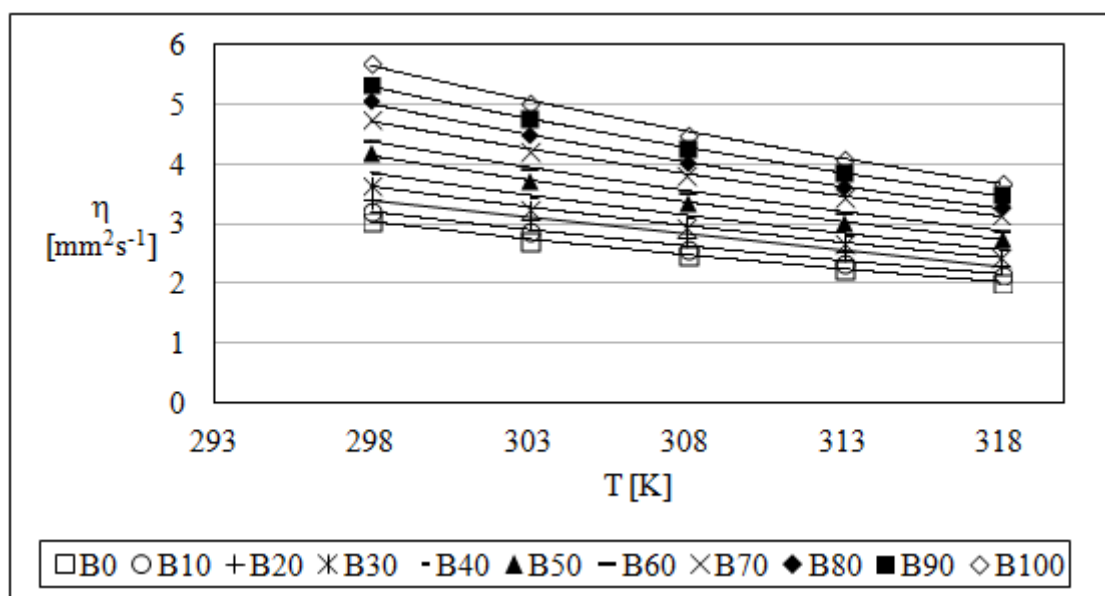


Figura VI.5.1 - Viscosidad cinemática en función de la temperatura de las mezclas biodiesel/gasoil [37].

En la Tabla VI.5.1 se muestra los valores de los parámetros de ajuste de la Ec. A.2, A y E_a , sus incertezas, ΔA y ΔE_a , la incerteza RMS de la estimación, $\Delta\eta$ y el coeficiente de determinación de los ajustes, R^2 , en el rango completo de composición.

Muestra	A [mm ² s ⁻¹]	ΔA [mm ² s ⁻¹]	E_a [eV]	ΔE_a [eV]	$\Delta \eta$ [mm ² s ⁻¹]	R^2
B0	0.0062	0.0006	0.159	0.003	0.02	0.999
B10	0.0060	0.0004	0.161	0.001	0.01	>0.999
B20	0.0065	0.0001	0.161	0.001	<0.01	>0.999
B30	0.0061	0.0004	0.164	0.002	0.01	>0.999
B40	0.0060	0.0003	0.166	0.001	0.01	>0.999
B50	0.0056	0.0005	0.169	0.002	0.01	>0.999
B60	0.0056	0.0003	0.171	0.002	0.01	>0.999
B70	0.0066	0.0007	0.169	0.003	0.01	0.999
B80	0.0052	0.0003	0.176	0.002	0.01	>0.999
B90	0.0061	0.0002	0.174	0.001	0.01	>0.999
B100	0.0060	0.0006	0.176	0.002	0.02	0.999

Tabla VI.5.1 - Parámetros de ajuste de la Ec. A.4.2 y sus incertezas.

A partir de la Figura VI.5.1 y de la Tabla V.5.1 puede verse que el modelo de la Ec. A.4.2 ajusta muy satisfactoriamente los datos experimentales ($R^2 > 0.999$).

Resulta de interés estudiar la dependencia de la energía de activación con la composición de las mezclas. En [45] se propuso que la energía de activación de la viscosidad dinámica de mezclas de aceite vegetal/gasoil podía obtenerse como una combinación lineal de las energías de activación de los componentes puros. Siguiendo esa idea, en el marco de esta tesis se propone que la energía de activación de las mezclas biodiesel/gasoil a una composición dada, $E_a(Bx)$, puede ser estimada mediante una combinación lineal de las energías de activación de gasoil puro ($E_a(B0)$) y biodiesel puro ($E_a(B100)$) [38],

$$E_a(Bx) = E_a(B0) + [E_a(B100) - E_a(B0)] \frac{Bx}{100} \quad (\text{VI.5.1})$$

Efectivamente, puede verificarse que la Ec. VI.5.1 ajusta los valores de la energía de activación de la viscosidad cinemática, E_a , listados en la Tabla VI.5.1 con una incerteza RMS menor al 1%.

Por otro lado, como se observa en la Figura VI.5.2, el factor pre-exponencial, A , de la Tabla VI.5.1, puede ser considerado constante, A^* , dentro del error experimental, en el rango completo de composición.

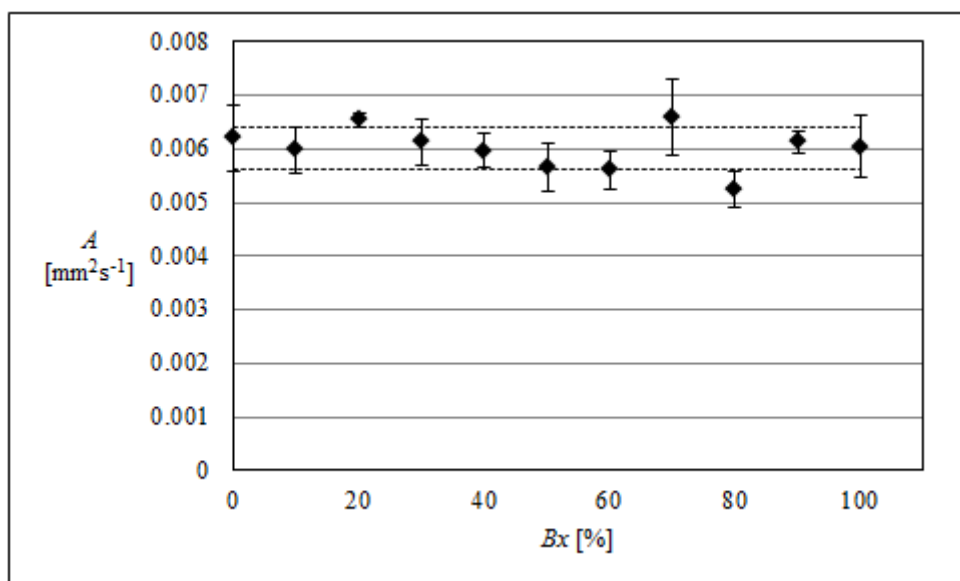


Figura VI.5.2 - Valores ajustados del factor pre-exponencial, A , de la Tabla VI.5.1 (símbolos). Valor promedio, A^* (línea continua). Límites de la banda de incerteza (líneas punteadas).

En la Figura VI.5.3 se muestran los datos experimentales de la viscosidad cinemática en función del contenido de biodiesel, a todas las temperaturas de medición.

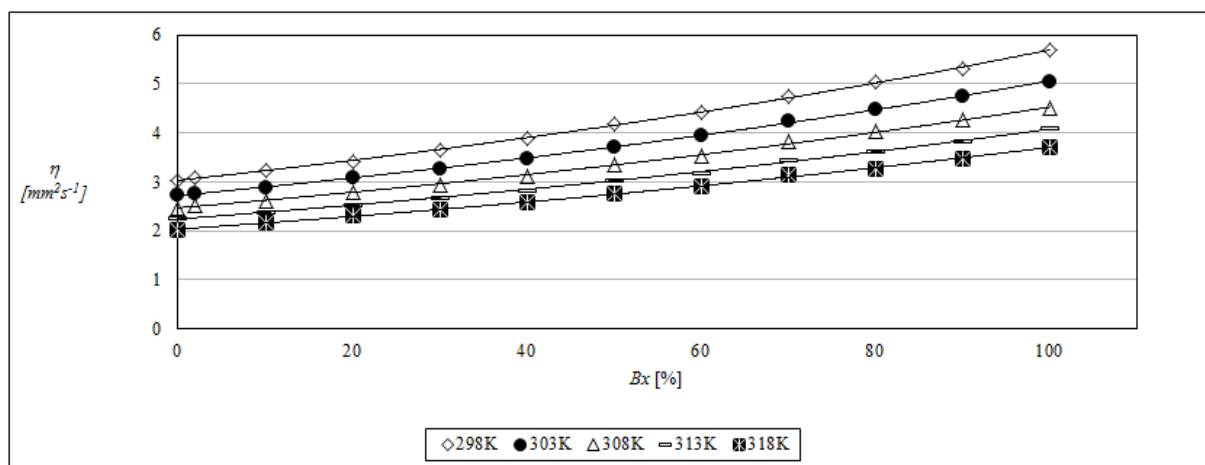


Figura VI.5.3 - Viscosidad cinemática en función del contenido de biodiesel, a todas las temperaturas de medición.

Los datos experimentales de la viscosidad cinemática fueron ajustados a cada temperatura con la Ec. VI.5.1

$$\eta(Bx) = Ce^{DBx} \quad (\text{VI.5.2})$$

donde C y D son parámetros de ajuste, y C está dado en mm^2s^{-1} y D en $\%^{-1}$. Cabe señalar que en [Ramírez-Verduzco] los autores plantean modelos empíricos similares al de la Ec. VI.5.2.

La Tabla VI.5.2 muestra los parámetros de ajuste de la Ec. VI.5.2 a cada una de las temperaturas de medición.

T [K]	C [mm^2s^{-1}]	ΔC [mm^2s^{-1}]	D [$\%^{-1}$]	ΔD [$\%^{-1}$]	$\Delta\eta$ [mm^2s^{-1}]	R^2
298	3.024	0.009	6.34E-03	5E-05	0.02	0.999
303	2.721	0.007	6.21E-03	4E-05	0.02	>0.999
308	2.461	0.007	6.11E-03	5E-05	0.02	0.999
313	2.241	0.006	5.98E-03	5E-05	0.01	0.999
318	2.035	0.009	6.00E-03	7E-05	0.02	0.999

Tabla VI.5.2 - Parámetros de ajuste de la Ec. VI.5.2 a cada temperatura de medición.

Como se observa en la Tabla VI.5.2, la Ec. VI.5.2 ajusta los datos experimentales muy satisfactoriamente ($R^2 > 0.999$).

Introduciendo la Ec. VI.5.2 en la Ec. 4.A.2 y utilizando el valor de A^* , la viscosidad cinemática de las mezclas biodiesel/gasoi, puede escribirse en el rango completo de temperatura y composición estudiado en este trabajo como

$$\eta(T, Bx) = A^* e^{\frac{E_a(Bx)}{kT}} \quad (\text{VI.5.3})$$

es decir

$$\eta(T, Bx) = A^* e^{\frac{E_a(DF) + [E_a(BD) - E_a(DF)] \frac{Bx}{100}}{kT}} \quad (\text{VI.5.4})$$

donde A^* es $(6.0 \pm 0.4) \times 10^{-3} \text{mm}^2 \text{s}^{-2}$.

Cabe señalar que, a una composición determinada, la Ec. VI.5.4 se simplifica a la Ec. 4.A.2, y, a una temperatura fija, a la Ec. VI.5.2. Por otra parte, es muy importante notar que los parámetros de la Ec. VI.5.4 solo dependen de la energía de activación del biodiesel y del gasoil, y de la constante A^* .

La Ec. VI.5.4 permite estimar la viscosidad cinemática de mezclas biodiesel/gasoil con una incerteza RMS de $0.07 \text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ en el rango completo de temperatura y composición. Como verificación, los parámetros A^* , $E_a(DF)$ y $E_a(BD)$ fueron obtenidos a través de una regresión múltiple no lineal llevada a cabo sobre la Ec. VI.5.4, utilizando todos los datos experimentales.

Parámetro	Valor
$A^* [\text{mm}^2 \text{s}^{-1}]$	0.0060
$E_a(DF) [\text{eV}]$	0.160
$E_a(BD) [\text{eV}]$	0.176

Tabla VI.5.3 - Parámetros A^* , $E_a(DF)$ y $E_a(BD)$ de la Ec. VI.5.4 obtenidos a partir de una regresión múltiple no lineal.

Si en la Ec. VI.5.4 se utilizan los valores de los parámetros listados en la Tabla VI.5.3, la incerteza RMS de la estimación es $0.01 \text{mm}^2 \text{s}^{-1}$. Comparando los valores listados en las Tablas VI.5.1 y VI.5.3, puede observarse que los mismos son muy próximos entre sí. En la Figura VI.5.4 muestra los valores experimentales de la viscosidad cinemática de las mezclas biodiesel/gasoil (esferas negras) y los valores estimados a partir de la Ec. VI.5.4 (esferas blancas), utilizando los parámetros de la Tabla VI.5.3.

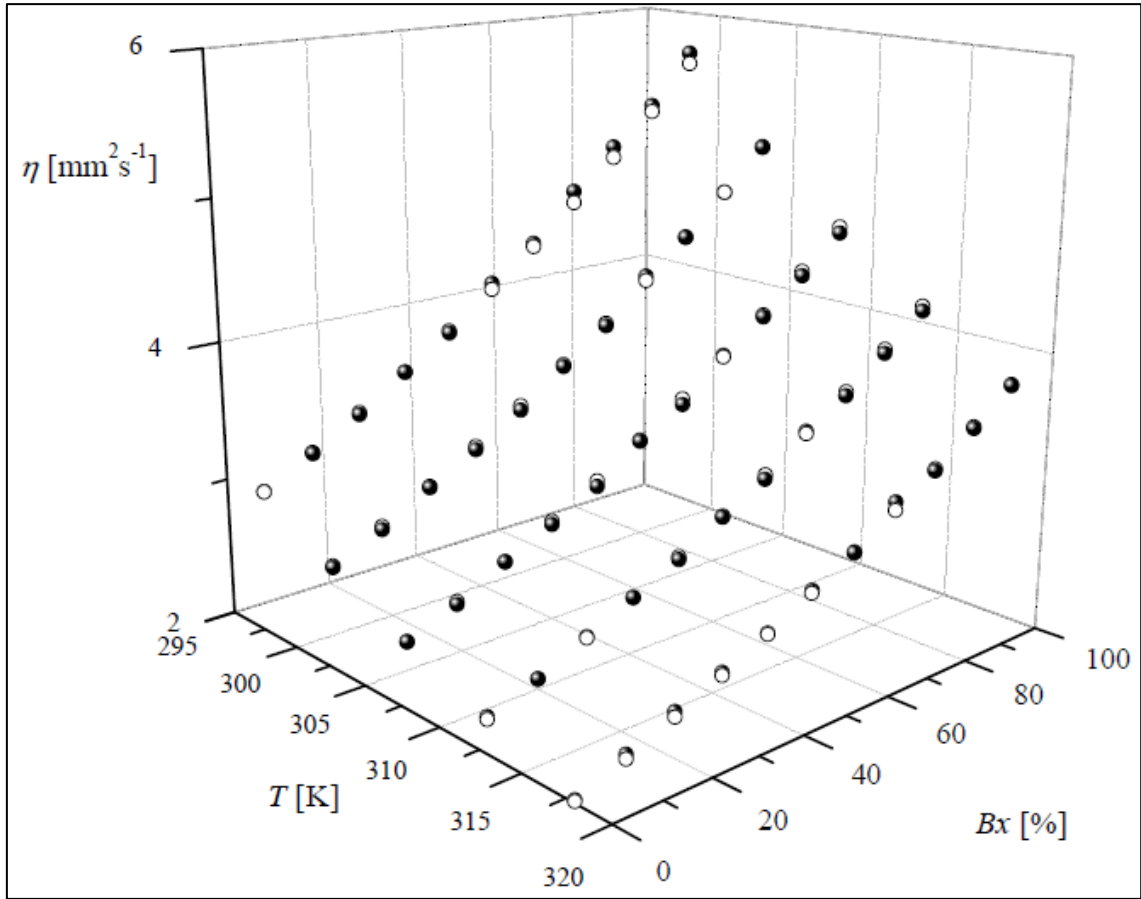


Figura VI.5.4 - Valores experimentales (esferas negras) y estimados (esferas blancas) de la viscosidad cinemática en función de la temperatura y la composición, con los parámetros de la Tabla VI.5.3.

Puede observarse en la Figura VI.5.4 que la estimación de la Ec. VI.5.4 es muy buena en todo el rango de temperatura y composición.

Por último, comparando las Ecs. VI.5.2 y VI.5.4, puede verse que el exponente de la Ec. VI.5.2, D , está dado por

$$D = \frac{[E_a(BD) - E_a(DF)]}{100kT} \quad (\text{VI.5.5})$$

Entonces, la Ec. VI.5.4 puede escribirse como

$$\eta(T, Bx) = \eta_{B0}(T) e^{\frac{[E_a(BD) - E_a(DF)] Bx}{kT \cdot 100}} \quad (\text{VI.5.6})$$

donde $\eta_{B0}(T)$ es la viscosidad cinemática del gasoil puro (B0) a la temperatura T .

VI.5.3. VISCOSIDAD CINEMÁTICA, PERMITIVIDAD Y TEMPERATURA

Dada la relación entre la viscosidad cinemática y la composición, por un lado, y entre la composición y la permitividad por el otro, es interesante analizar la relación entre la permitividad y la viscosidad cinemática de mezclas biodiesel/gasoil.

En la Figura VI.5.5 se muestra un gráfico de los valores experimentales de la viscosidad cinemática en función de la permitividad y la temperatura de las mezclas biodiesel/gasoil.

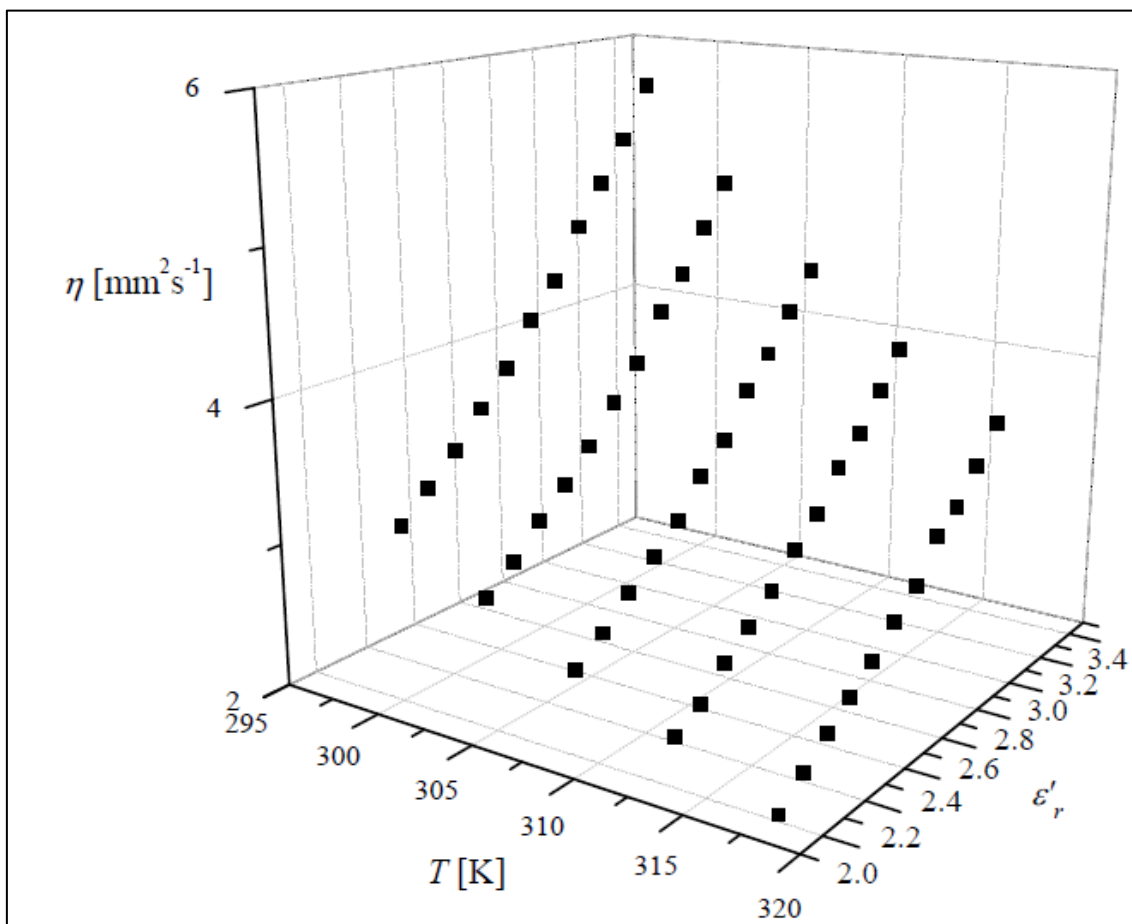


Figura VI.5.5 - Valores experimentales de la viscosidad cinemática en función de la permitividad y de la temperatura de las mezclas biodiesel/gasoil.

La superficie de la Figura VI.5.5 es suave y regular, de modo que puede ser descripta en términos de funciones analíticas simples de la permitividad y la temperatura.

A cada temperatura, la viscosidad cinemática de las mezclas depende exponencialmente del contenido de biodiesel (Ec. VI.5.2), mientras que la permitividad relativa depende linealmente del contenido de biodiesel, Bx , (Ec. VI.4.1.). Entonces, es razonable proponer una dependencia exponencial entre la viscosidad cinemática y la permitividad,

$$\eta(T, \epsilon'_r) = \eta_o(T) e^{\frac{\epsilon'_r}{\epsilon(T)}} \quad (\text{VI.5.7})$$

donde η_o y $\epsilon(T)$ son parámetros de ajuste. Los valores de estos parámetros a cada temperatura de medición se muestran en la Tabla VI.5.4 junto a sus incertezas. La unidad de η_o es mm^2s^{-1} y $\epsilon(T)$ es adimensional.

T [K]	η_o [mm^2s^{-1}]	$\Delta\eta_o$ [mm^2s^{-1}]	ϵ	$\Delta\epsilon$	$\Delta\eta$ [mm^2s^{-1}]	R^2
298	0.92	0.01	0.00180	0.00001	0.02	>0.999
303	0.85	0.01	0.00182	0.00001	0.02	>0.999
308	0.80	0.01	0.00184	0.00002	0.02	0.999
313	0.74	0.01	0.00185	0.00001	0.02	0.999
318	0.68	0.01	0.00184	0.00002	0.02	0.999

Tabla VI.5.4 - Parámetros de ajuste de la Ec. VI.5.7, η_o y ϵ con sus incertezas, $\Delta\eta_o$ y $\Delta\epsilon$.

Puede verse en la Tabla VI.5.4 que el ajuste de la Ec. VI.5.7 a los datos experimentales es muy satisfactorio ($R^2 \geq 0.999$) a todas las temperaturas de medición.

En la Figura VI.5.6 se grafica la viscosidad cinemática, η , en función de la permitividad, ϵ'_r , a todas las temperaturas de medición, y los ajustes de la Ec. VI.5.7.

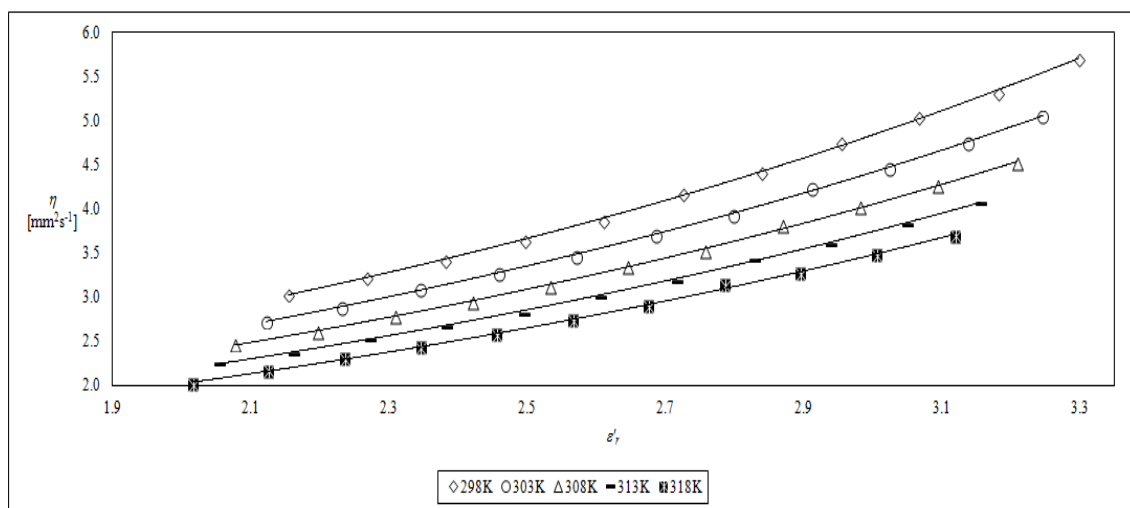


Figura VI.5.6 - Viscosidad cinemática, η , en función de la permitividad, ε'_r , a todas las temperaturas de medición.

En la sección VI.4 se mostró que el contenido de biodiesel de las mezclas biodiesel/gasoil, Bx , puede estimarse a partir de la permitividad y la temperatura mediante la Ec. VI.4.11, transcripta a continuación,

$$B_x(\varepsilon'_r, T) = \frac{\varepsilon'_r - a - bT}{c + dT} \quad (\text{VI.4.11})$$

Los valores de las constantes a , b , c y d de la Ec. VI.4.11 pueden obtenerse a partir de los parámetros del biodiesel y el gasoil, aplicando las Ecs. VI.4.7 a VI.4.10. Los parámetros así obtenidos para las muestras de biodiesel y gasoil estudiadas en esta sección, se listan en la Tabla VI.5.5.

a	b	c	d
4.203	-0.0069	0.0176	-2.08E-05

Tabla VI.5.5 - Constantes a , b , c y d de la Ec. VI.4.11 de las muestras de biodiesel y gasoil estudiadas en esta sección.

La estimación de Bx dada por la Ec. VI.4.11 puede introducirse en la Ec. VI.5.6 para estimar la viscosidad cinemática en términos de la permitividad y la temperatura. Resulta entonces

$$\eta(T, \varepsilon'_r) = \eta(B0) e^{\frac{[E_a(BD) - E_a(DF)](\varepsilon'_r - a - bT)}{100kT(c + dT)}} \quad (\text{VI.5.8})$$

Como se muestra en la Figura VI.5.7, la concordancia entre los valores experimentales y los estimados por la Ec. VI.5.8 es muy buena. La incerteza RMS del ajuste de la Ec. VI.5.8, utilizando los parámetros de las Tablas VI.5.3 y VI.5.5, es $0.02 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$.

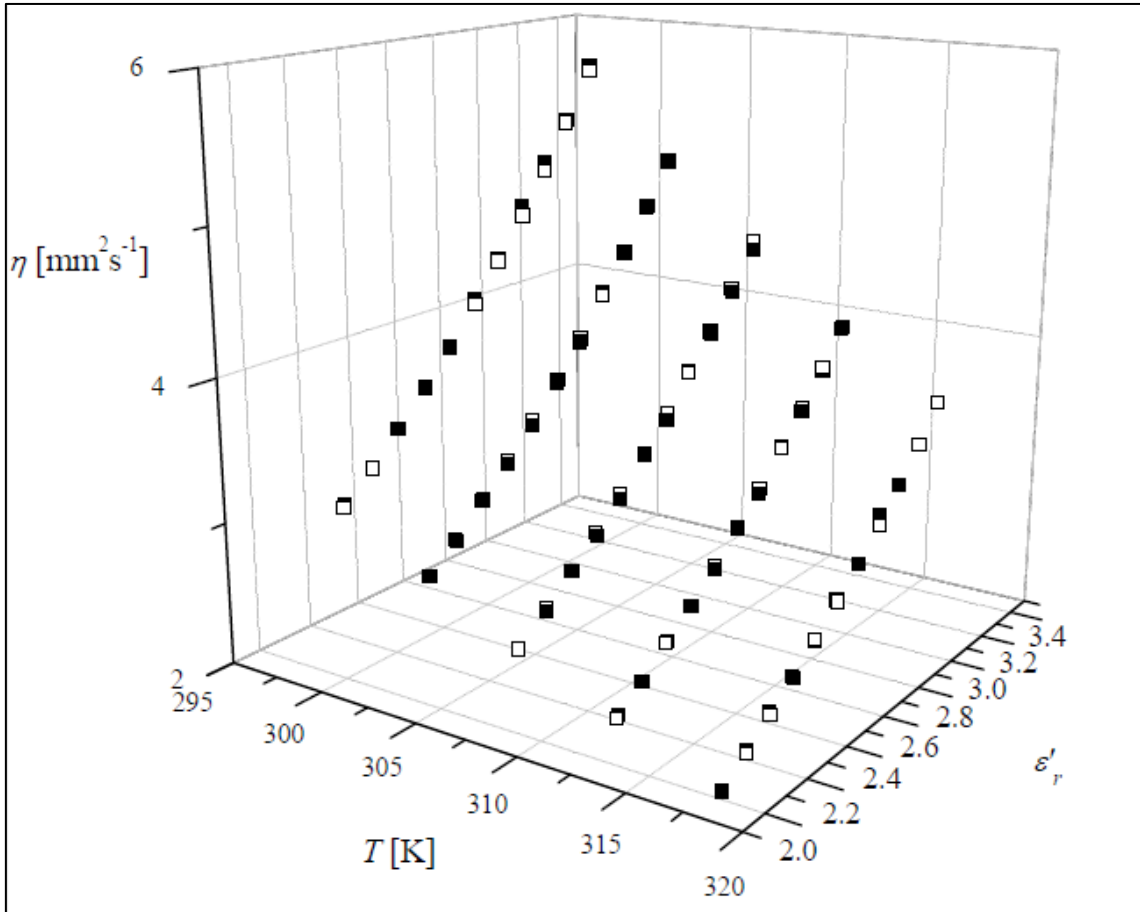


Figura VI.5.7 - Valores experimentales y estimados de la viscosidad cinemática en función de la temperatura y la permitividad.

Como se observa en la Figura VI.5.7, la Ec. VI.5.8 puede utilizarse para estimar de manera precisa la viscosidad cinemática de mezclas biodiesel/gasoil a partir de mediciones de permitividad y temperatura.

Es importante remarcar que todos los parámetros del modelo de la Ec. VI.5.8 pueden obtenerse utilizando únicamente los valores de los parámetros de ajuste de la permitividad y la viscosidad cinemática del biodiesel y del gasoil.

VI.6: PERMITIVIDAD DE MEZCLAS DE ACEITE DE SOJA Y BIODIESEL INDUSTRIALES

En esta sección se analizan los resultados experimentales de la permitividad de las mezclas de biodiesel y aceite de soja industriales, presentados en la sección V.5. A partir del análisis, se propone un modelo para estimar la permitividad de mezclas biodiesel/aceite de soja a partir de la composición y la temperatura, y un modelo para estimar la composición a partir de la permitividad y temperatura. El análisis es análogo al utilizado para desarrollar los modelos para estimar la permitividad y composición en las mezclas biodiesel/gasoil.

VI.6.1. ANTECEDENTES

El estudio de las mezclas de aceite de soja y biodiesel reviste interés tanto para productores de biodiesel como para consumidores. Los motivos por los cuales puede encontrarse aceite vegetal en el producto final son, o bien una conversión incompleta del aceite en biodiesel, o bien adulteración de biodiesel con aceite vegetal [17]. Desde el punto de vista de los productores de biodiesel es deseable contar con métodos para determinar la eficiencia de la transesterificación [30,31]. Desde el punto de vista de los usuarios, la presencia de aceite vegetal en el producto final es indeseable ya que puede reducir la performance de los motores y, por ejemplo, dañar los filtros [17].

Como se indica en el capítulo 1, la eficiencia de la conversión se determina, de acuerdo a los estándares internacionales, utilizando métodos cromatográficos. Para tal fin, se mide el contenido de mono, di y triglicéridos de la fase liviana (metilésteres) una vez llevada a cabo la purificación los metilésteres obtenidos luego de la transesterificación. La implementación de mediciones cromatográficas a sistemas *online* no es práctica [10,30,31]. Además, la cromatografía tiene asociados altos costos tanto por el instrumental en sí, como también porque requiere mano de obra altamente calificada para su operación [10,18,25,27]. Esto significa una limitación importante, especialmente para los productores pequeños y medianos, en instituciones con bajos recursos, universidades, centros de investigación, etc. En consecuencia, la implementación de métodos alternativos económicos, rápidos y que no demanden

personal especializado para la determinación del avance de la transfesterificación y la detección de aceite vegetal es de interés tecnológico [8,9,27,30,31,32,33].

VI.6.2. PERMITIVIDAD

En la Tabla VI.6.1 se muestran los parámetros de ajuste de la Ec. III.27 a los datos experimentales de todas las mezclas biodiesel/aceite de soja industriales estudiadas (Tabla V.5.1). Los valores de $\varepsilon'_r(T_o)$ y $\delta\varepsilon'_r/\delta T$ están dados junto a sus incertezas, $\Delta\varepsilon'_r(T_o)$ y $\Delta\delta\varepsilon'_r/\delta T$. La incerteza RMS del ajuste, $\Delta\varepsilon'_r$, y el coeficiente de determinación, R^2 , también están listados. La temperatura de referencia es $T_o=318K$.

Muestra	$\varepsilon'_r(T_o)$	$\Delta\varepsilon'_r(T_o)$	$\delta\varepsilon'_r/\delta T$ [K] ⁻¹	$\Delta\delta\varepsilon'_r/\delta T$ [K] ⁻¹	$\Delta\varepsilon'_r$	R^2
B0	3.000	0.002	-0.0038	0.0001	0.01	0.995
B10	3.013	0.004	-0.0036	0.0002	0.01	0.981
B20	3.037	0.001	-0.0033	0.0001	0.00	0.997
B30	3.050	0.002	-0.0034	0.0001	0.01	0.993
B40	3.054	0.004	-0.0042	0.0002	0.01	0.986
B50	3.084	0.003	-0.0041	0.0002	0.01	0.994
B60	3.092	0.001	-0.0037	0.0001	0.00	0.999
B70	3.112	0.005	-0.0045	0.0003	0.01	0.983
B80	3.130	0.003	-0.0044	0.0002	0.01	0.991
B90	3.122	0.003	-0.0047	0.0002	0.01	0.993
B100	3.135	0.003	-0.0054	0.0002	0.01	0.995

Tabla VI.6.1 - Valores de los parámetros de ajuste al modelo de la Ec. III.27 de las mezclas biodiesel/aceite de soja.

Se observa en la Tabla VI.6.1 que el ajuste de los datos experimentales de la permitividad a la Ec. III.27 es muy satisfactorio a todas las composiciones. Además, a una temperatura dada, el valor de la permitividad aumenta con el contenido de biodiesel, Bx .

En la Figura VI.6.1 se grafican los valores de la permitividad en función de la temperatura de las mezclas biodiesel/aceite de soja industriales estudiadas (proyección sobre el plano (ε'_r, T)). Los símbolos corresponden a las diferentes composiciones.

Como los datos experimentales toman valores muy próximos entre sí, no se han graficado los ajustes de la Ec. III.27 a fin de lograr una mayor claridad de la figura.

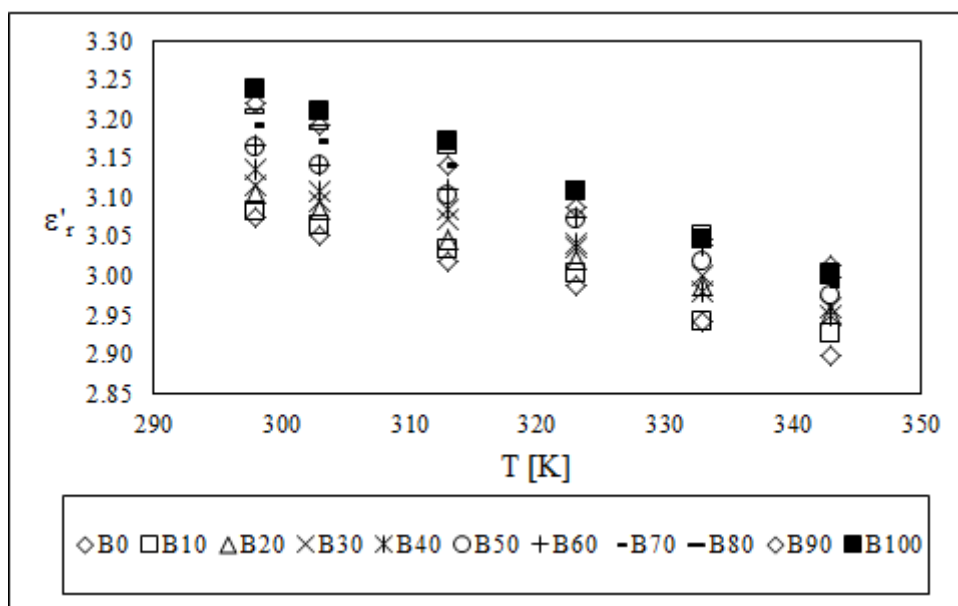


Figura VI.6.1 - Valores de la permitividad (símbolos) en función de la temperatura de mezclas biodiesel/aceite de soja industriales y ajustes de la Ec. III.27.

En la Figura VI.6.1 se observa que el aceite de soja y el biodiesel tienen valores de permitividad muy próximos entre sí en todo el rango de temperatura. Por otro lado, el valor de $\varepsilon'_r(T_o)$ como el módulo de la pendiente ($\partial\varepsilon'_r/\partial T$) aumentan con el contenido de biodiesel. A diferencia de las mezclas biodiesel/gasoil, cuyas permitividades difieren entre sí en aproximadamente un 50%, la permitividad del biodiesel y del aceite de soja industriales difieren tan solo un 5%. Entonces, son necesarias mediciones más precisas para discriminar entre ambas sustancias a partir de mediciones de permitividad, especialmente a temperaturas elevadas.

Los resultados de la Tabla VI.6.1 muestran que el modelo de la Ec. III.27 es válido en el rango completo de composición de mezclas biodiesel/aceite de soja y a todas las temperaturas estudiadas.

VI.6.3. ESTIMACIÓN DE LA PERMITIVIDAD DE MEZCLAS BIODIESEL/ACEITE DE SOJA INDUSTRIALES

En la Figura VI.6.2 se muestran los valores de la permitividad de las mezclas biodiesel/aceite de soja en función de la composición, a temperaturas entre 303K y 343K.

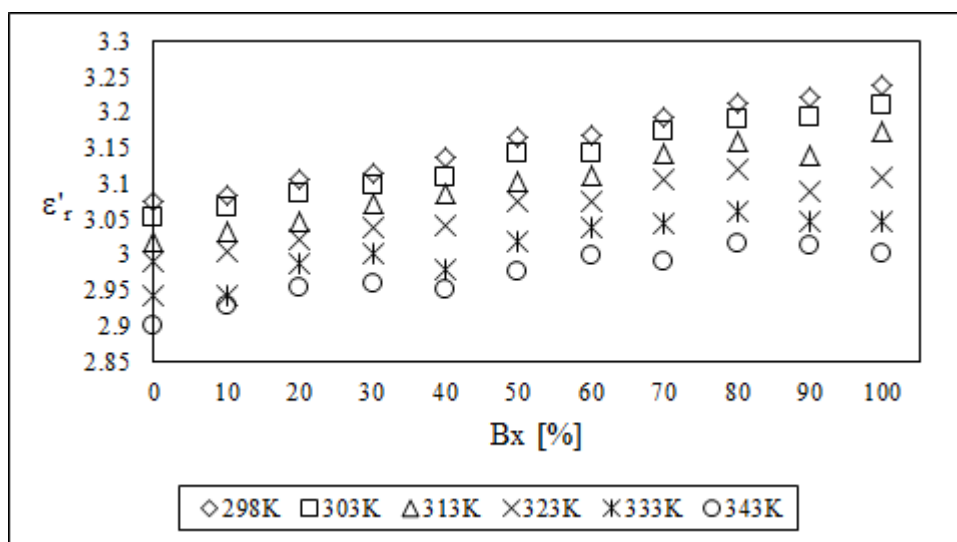


Figura VI.6.2 - Permitividad relativa de las mezclas biodiesel/aceite de soja industriales en función del contenido de biodiesel a todas las temperaturas de medición.

Para cada una de las temperaturas de medición se propone un ajuste lineal de la permitividad en función del contenido de biodiesel,

$$\varepsilon'_r(Bx, T) = \varepsilon'_r(B0, T) + \frac{\delta \varepsilon'_r}{\delta Bx} Bx \quad (\text{VI.6.1})$$

donde $\varepsilon'_r(B0, T)$ es el valor de la permitividad del aceite de soja puro a la temperatura de medición, y $\frac{\delta \varepsilon'_r}{\delta Bx}$ está evaluada a la temperatura de medición y a la composición B0 (sus unidades son $\%^{-1}$).

Los parámetros de ajuste de la Ec. VI.6.1, $\varepsilon'_r(B0)$ y $\delta \varepsilon'_r / \delta Bx$, están listados en la Tabla VI.6.2 para cada temperatura de medición. En la Tabla VI.6.2 también se presentan las

incertezas, $\Delta \varepsilon'_r(B0)$ y $\Delta \delta \varepsilon'_r / \delta Bx$, la incerteza RMS del ajuste, $\Delta \varepsilon'_r$, y el coeficiente de determinación, R^2 .

Temperatura [K]	$\varepsilon'_r(B0)$	$\Delta(\varepsilon'_r(B0))$	$\delta \varepsilon'_r / \delta Bx$ [%] ⁻¹	$\Delta(\delta \varepsilon'_r / \delta Bx)$ [%] ⁻¹	$\Delta \varepsilon'_r$	R^2
298	3.07	0.00	0.0017	0.0001	0.01	0.992
303	3.05	0.00	0.0016	0.0001	0.01	0.986
313	3.02	0.01	0.0015	0.0001	0.01	0.968
323	3.00	0.01	0.0013	0.0001	0.01	0.907
333	2.95	0.01	0.0012	0.0002	0.02	0.858
343	2.92	0.01	0.0010	0.0001	0.01	0.880

Tabla VI.6.2 - Parámetros de ajuste de la Ec. VI.6.1, incerteza RMS del ajuste y coeficiente de determinación R^2 .

A partir de la Tabla VI.6.1 puede verse que el modelo lineal de la Ec. VI.6.1 ajusta satisfactoriamente los resultados experimentales únicamente a las temperaturas entre 298K y 323K ($R^2 > 0.9$). A temperaturas superiores, los valores de la permitividad del aceite de soja y del biodiesel son demasiado próximos entre sí, y si bien el modelo lineal de la Ec. VI.6.1 no ajusta satisfactoriamente los datos, la calidad de los datos experimentales no justifica proponer otro modelo.

A modo de ejemplo, en la Figura VI.6.3 se muestra con mayor detalle el ajuste de los valores de la permitividad (símbolos) al modelo lineal de la Ec. VI.6.1, a las temperaturas de 298K y 303K. Las líneas continuas indican el ajuste de la Ec. VI.6.1 y las líneas punteadas indican los límites de la bandas de incerteza (un desvío estándar).

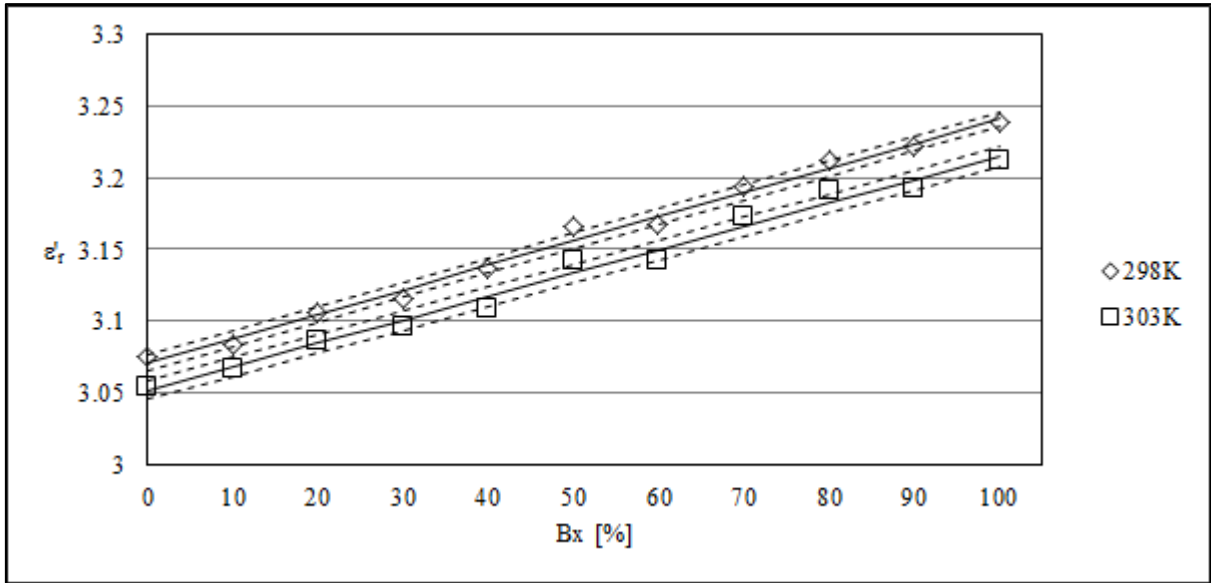


Figura VI.6.3 - Permitividad relativa, ϵ_r' , en función del contenido de biodiesel, Bx , a $T=298K$ y $T=303K$.

En la Figura VI.6.3 se observa la calidad del ajuste de la Ec. VI.6.1 y la proximidad entre ambas curvas.

Como en el caso de las mezclas biodiesel/gasoil, es deseable obtener una expresión que permita obtener la permitividad en función de la composición y de la temperatura. Como paso previo, es necesario estudiar la dependencia de $\delta\epsilon_r'/\delta Bx$ con la temperatura. Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla VI.6.2, el análisis siguiente está limitado a temperaturas entre 298K y 323K.

En la Figura VI.6.4 se grafican los valores de $\delta\epsilon_r'/\delta Bx$ (símbolos) obtenidos de la Tabla VI.6.2, en función de la temperatura de medición.

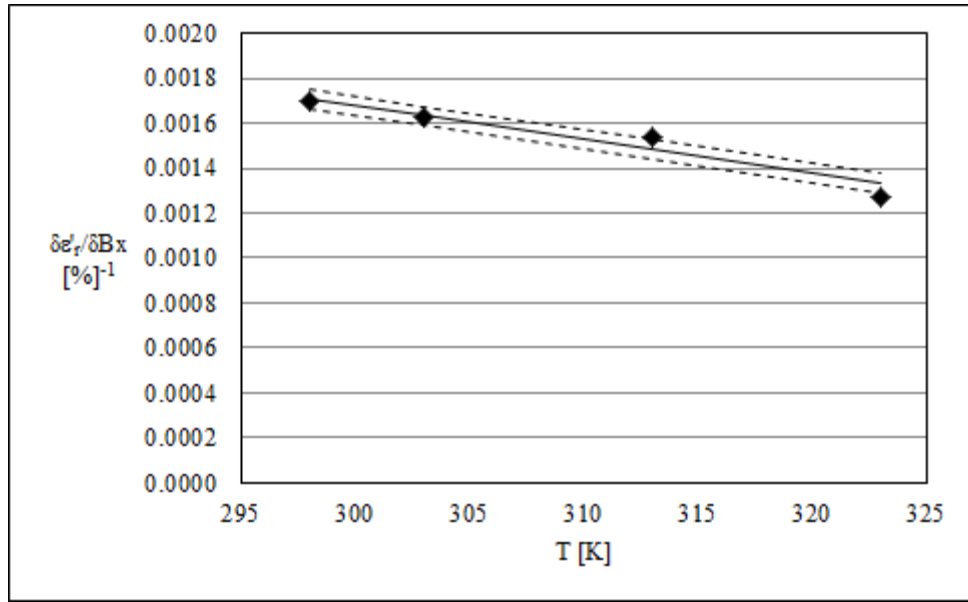


Figura VI.6.4 - $\delta \varepsilon'_r(T) / \delta Bx$ en función de la temperatura.

Según se observa en la Figura VI.6.4, es posible plantear una dependencia lineal entre $\delta \varepsilon'_r / \delta Bx$ y la temperatura.

$$\frac{\delta \varepsilon'_r(T)}{\delta Bx} = \frac{\delta \varepsilon'_r(T_o)}{\delta Bx} + \frac{\delta^2 \varepsilon'_r}{\delta Bx \delta T} (T - T_o) \quad (\text{VI.6.2})$$

En la Tabla VI.6.3 se muestran los resultados del ajuste de $\delta \varepsilon'_r / \delta Bx$ a la Ec. VI.6.2, incluyendo los parámetros de ajuste, $\delta \varepsilon'_r(T_o) / \delta Bx$ y $\delta^2 \varepsilon'_r(T_o) / \delta Bx \delta T$. Las incertezas de los parámetros de ajuste, $\Delta \delta \varepsilon'_r(T_o) / \delta Bx$ y $\Delta \delta^2 \varepsilon'_r(T_o) / \delta Bx \delta T$, la incerteza RMS del ajuste, $\Delta \left(\frac{\delta \varepsilon'_r(T)}{\delta Bx} \right)$, y el coeficiente de determinación, R^2 , también están listados en la Tabla VI.6.3.

$\frac{\delta \varepsilon'_r(T_o)}{\delta Bx}$ [%] ⁻¹	$\Delta \left(\frac{\delta \varepsilon'_r(T_o)}{\delta Bx} \right)$ [%] ⁻¹	$\frac{\delta^2 \varepsilon'_r}{\delta Bx \delta T}$ [%K] ⁻¹	$\Delta \left(\frac{\delta^2 \varepsilon'_r}{\delta Bx \delta T} \right)$ [%K] ⁻¹	$\Delta \left(\frac{\delta \varepsilon'_r}{\delta Bx} \right)$ [%] ⁻¹	R^2
3.9400	0.0515	-2.9E-03	2E-04	3E-03	0.994

Tabla VI.6.3 - Parámetros de ajuste de la Ec. VI.6.2, incerteza RMS del ajuste y coeficiente de determinación.

A partir de la Tabla VI.6.3 se puede ver que el ajuste de la Ec.VI.6.2 es muy satisfactorio.

Introduciendo la Ec. VI.6.2 en la Ec. VI.6.1, puede estimarse la permitividad en función de la temperatura y de la composición según

$$\varepsilon'_r(Bx, T) = \varepsilon'_r(B0, T_o) + \frac{\delta\varepsilon'_r(B0, T_o)}{\delta T} (T - T_o) + \left[\frac{\delta\varepsilon'_r(T_o)}{\delta Bx} + \frac{\delta^2\varepsilon'_r}{\delta Bx\delta T} (T - T_o) \right] Bx \quad (\text{VI.6.3})$$

Como en el caso de las mezclas biodiesel/gasoil, los cuatro parámetros de la Ec.VI.6.3 ($\varepsilon'_r(B0, T_o)$, $\frac{\delta\varepsilon'_r(B0, T_o)}{\delta T}$, $\frac{\delta\varepsilon'_r(T_o)}{\delta Bx}$ y $\frac{\delta^2\varepsilon'_r}{\delta Bx\delta T}$) pueden obtenerse a partir de los permitividades del biodiesel y del aceite de soja: $\varepsilon'_r(B0, T_o)$ y $\frac{\delta\varepsilon'_r(B0, T_o)}{\delta T}$ son los dos parámetros de ajuste de la Ec. III.27 de la permitividad del aceite de soja, y los parámetros $\frac{\delta\varepsilon'_r(T_o)}{\delta Bx}$ y $\frac{\delta^2\varepsilon'_r}{\delta Bx\delta T}$ pueden estimarse como

$$\frac{\delta\varepsilon'_r(T_o)}{\delta Bx} = \frac{\varepsilon'_r(B100, T_o) - \varepsilon'_r(B0, T_o)}{100} \quad (\text{VI.6.4})$$

y

$$\frac{\delta^2\varepsilon'_r}{\delta Bx\delta T} = \frac{\frac{\delta\varepsilon'_r(T_o)}{\delta Bx}}{333K - 298K} \quad (\text{VI.6.5})$$

Agrupando los términos de la Ec. VI.6.3, la misma puede escribirse de forma más compacta como

$$\varepsilon'_r(Bx, T) = a + bT + cBx + dTBx \quad (\text{VI.6.6})$$

donde

$$a = \varepsilon'_r(B0, T_o) - \frac{\delta\varepsilon'_r(B0, T_o)}{\delta T} T_o \quad (\text{VI.6.7})$$

$$b = \frac{\delta \varepsilon'_r(B0, T_0)}{\delta T} \quad (\text{VI.6.8})$$

$$c = \frac{\delta \varepsilon'_r(T_0)}{\delta Bx} - \frac{\delta^2 \varepsilon'_r}{\delta Bx \delta T} T_0 \quad (\text{VI.6.9})$$

$$d = \frac{\delta^2 \varepsilon'_r}{\delta Bx \delta T} \quad (\text{VI.6.10})$$

Los coeficientes a , b , c y d de la Ec. VI.6.6 también fueron determinados a partir de una regresión multivariable utilizando los datos experimentales correspondientes a temperaturas entre 298K y 323K. En la Tabla VI.6.4 se muestran los valores de los parámetros de la Ec. VI.4.6 así obtenidos, junto a la incerteza RMS del ajuste de la permitividad, $\Delta \varepsilon'_r$.

a	$b [K]^{-1}$	$c [\%]^{-1}$	$d [\%K]^{-1}$	$\Delta \varepsilon'_r$
3.94	-1.65E-05	-0.0029	0.0066	0.009

Tabla VI.6.4 - Parámetros de ajuste de la Ec. VI.6.6 e incerteza RMS de la estimación de la permitividad, $\Delta \varepsilon'_r$.

Los coeficientes de la Tabla VI.6.4 concuerdan muy bien con aquellos obtenidos utilizando las Ecs. VI.6.7 a VI.6.10, calculados a partir de los parámetros del biodiesel y del aceite de soja, listados en las Tablas VI.6.1, VI.6.2 y VI.6.3.

En la Figura VI.6.6 están graficados los valores de la permitividad (esferas negras) y los estimados a partir de la Ec. VI.4.6 (esferas blancas) en función de la temperatura, T , y de la composición, Bx .

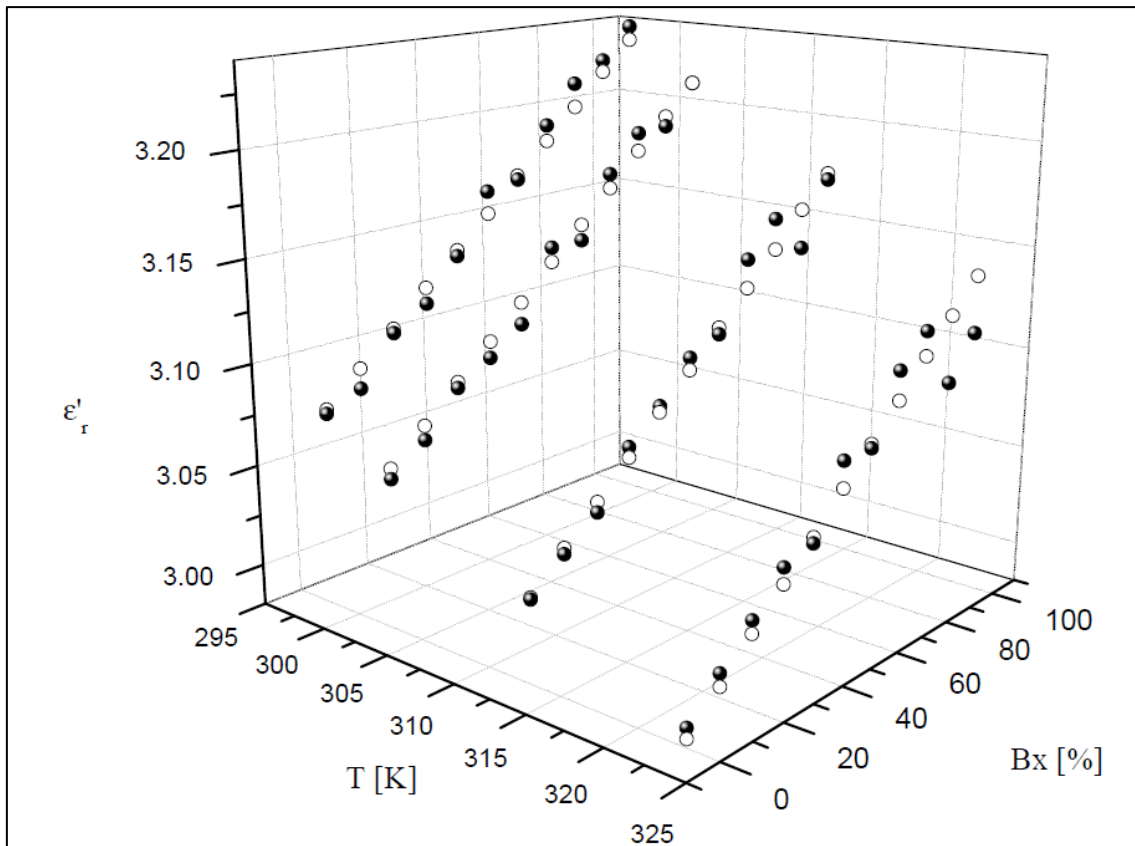


Figura VI.6.5 - Valores experimentales (esferas negras) y estimados (esferas blancas) de la permitividad de las mezclas biodiesel/aceite de soja en función de la temperatura y la composición.

Según se observa en la Figura VI.6.5, los valores de la permitividad y los estimados por la Ec. VI.6.3 concuerdan satisfactoriamente en los rangos de temperatura y composición estudiados. La estimación mejora a temperaturas próximas al ambiente.

VI.6.3. ESTIMACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE MEZCLAS BIODIESEL/ACEITE DE SOJA

De manera análoga al caso de las mezclas biodiesel/gasoil, el hecho de que el modelo de la Ec. VI.6.3 ajuste satisfactoriamente los valores de la permitividad de las mezclas biodiesel/aceite de soja, sugiere la posibilidad de utilizar el siguiente modelo para estimar el contenido de biodiesel a partir de mediciones de permitividad y temperatura,

$$B_x(\varepsilon'_r, T) = \frac{\varepsilon'_r - a' - b'T}{c' + d'T} \quad (\text{VI.6.11})$$

Los parámetros de la Ec. VI.6.11 fueron determinados a partir de una regresión no lineal multivariable utilizando todos datos experimentales correspondientes a temperaturas entre 298K y 323K. En la Tabla VI.6.5 se muestran los valores de los parámetros así obtenidos y la incerteza RMS de la estimación de la composición, ΔBx .

a'	$b' [K]^{-1}$	$c' [\%]^{-1}$	$d' [\%K]^{-1}$	$\Delta Bx [\%]$
3.94	-1.65E-05	-0.0029	0.0066	6

Tabla VI.6.5 - Parámetros de ajuste de la Ec. VI.6.11 e incerteza RMS de la estimación de la composición, ΔBx .

Debe destacarse que los coeficientes de las Tablas VI.6.4 y VI.6.5 concuerdan muy bien entre sí.

En la Figura VI.6.6 se grafica la composición de las muestras (triángulos negros) y la estimación de la composición dada por el modelo de la Ec. VI.6.11 (triángulos blancos) en función de la temperatura y de la permitividad.

El ajuste del modelo de la Ec. VI.6.11 es satisfactorio, siendo la incerteza absoluta (RMS) de la estimación del 6% en todo el rango de temperaturas y composiciones estudiado. Cabe señalar que la estimación mejora a temperaturas próximas al ambiente. Por ejemplo, a temperaturas entre 298K y 303K el error RMS en la estimación de la composición es del 3.5%.

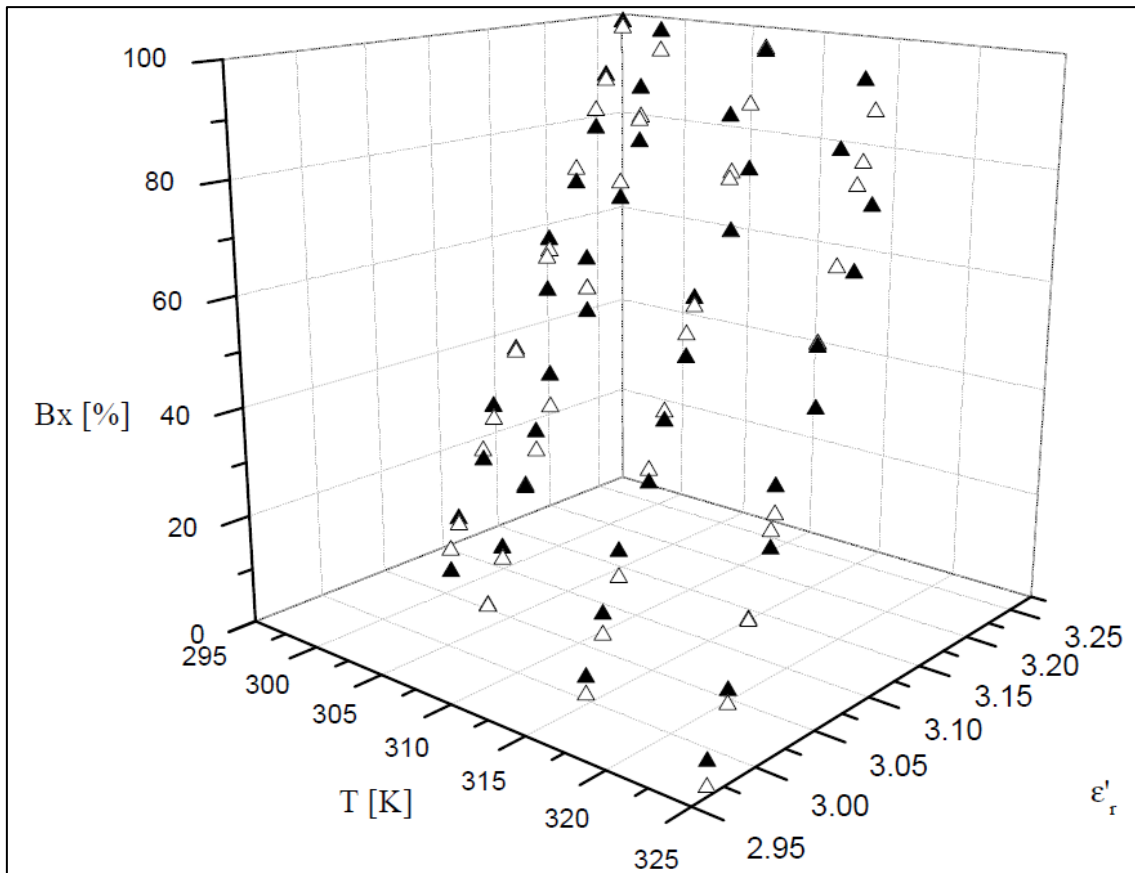


Figura VI.6.6 - Contenido de biodiesel (triángulos negros), Bx , y estimaciones a partir de la Ec. VI.6.11 (triángulos blancos).

REFERENCIAS

- [1] Yang J, Zhao KS, He YJ. Quality evaluation of frying oil deterioration by dielectric spectroscopy. *Journal of Food Engineering* 2016;180:69-76.
- [2] Khaled AY, Aziz SA, Rokhani FZ. Capacitive sensor probe to assess frying oil degradation. *Information processing in agriculture* 2015;2:142-148.
- [3] Hu L, Toyoda K, Ihara I. Discrimination of olive oil adulterated with vegetable oils using dielectric spectroscopy. *Journal of Food Engineering* 2010;96(2):167-171.

- [4] Hu L, Toyoda K, Ihara I. Dielectric properties of edible oils and fatty acids as a function of frequency, temperature, moisture and composition. *Journal of Food Engineering* 2008;88(2):151-158.
- [5] Inoue C, Hagura Y, Ishikawa M, Suzuki K. The Dielectric Property of Soybean Oil in Deep-Fat Frying and the Effect of Frequency. *Journal of Food Science* 2002;67(3):1126-1129.
- [6] Tat ME, Van Gerpen JH. Biodiesel blend detection using a fuel composition sensor. ASAE Ann Int Meet 2001. <http://web.cals.uidaho.edu/biodiesel/files/2013/08/ASABE-01-6052.pdf>.
- [7] Munack A, Speckmann H, Krah J, Marto A, Bantzhaff R. A Sensor for Discrimination of Fossil Diesel Fuel, Biodiesel, and Their Blends. In: Knothe G, Krah J, Van Gerpen J, editors. *The Biodiesel Handbook*. 2nd ed, Urbana: AOCS Press, 2010, p. 131-136.
- [8] De Souza JE, Scherer MD, Cáceres JAS, Caires ARL, M'Peko JC. A close dielectric spectroscopic analysis of diesel/biodiesel blends and potential dielectric approaches for biodiesel content assessment. *Fuel* 2013;105:705-710.
- [9] M'Peko JC, Reis DLS, De Souza JE, Caires ARL. Evaluation of the dielectric properties of biodiesel fuels produced from different vegetable oil feedstocks through electrochemical impedance spectroscopy. *Int J Hydrogen Energy* 2013;105(22):9355–9. 38.
- [9] Gonzalez Prieto LE, Sorichetti PA, Romano SD. Electric properties of biodiesel in the range from 20 Hz to 20 MHz. Comparison with diesel fossil fuel. *Int J Hydrogen Energy* 2008;33:3531-3537.
- [10] Romano SD, Sorichetti PA. *Dielectric relaxation spectroscopy in biodiesel production and characterization*. Springer Verlag, Londres, 2011.

- [11] Tat M, Gerpen J. Measurement of biodiesel speed of sound and its impact on injection timing. National renewable energy laboratory 2003; NREL/SR-510-31462.
- [12] Albo GPA, Lago S. Experimental speed-of-sound measurements of pure fatty acids methyl ester, mineral diesel and blends in a wide range of temperature and for pressures up to 300 MPa. Fuel 2014;115:740-748.
- [13] Lopes AFG, Talavera-Prieto MC, Ferreira AGM, Santos JB, Santos MJ, Portugal ATG. Speed of sound in pure fatty acid methyl esters and biodiesel fuels. Fuel 2014;116:242–254.
- [14] Freitas SVD, Paredes MLL, Daridon JL, Lima AS, Coutinho JAP. Measurement and prediction of the speed of sound of biodiesel fuels. Fuel 2013;103:1018-1022.
- [15] Freitas SVD, Santos A, Moita MLCJ, Follegatti-Romero LA, Dias TPVB, Meirelles AJA, Daridon JL, Lima AS, Coutinho JAP. Measurement and prediction of speeds of sound of fatty acid ethyl esters and ethylic biodiesels. Fuel 2013;108:840–845.
- [16] Zabala S, Arzamendi GI, Reyero I, Gandía RM. Monitoring of the methanolysis reaction for biodiesel production by off-line and on-line refractive index and speed of sound measurements. Fuel 2014;121:157–164.
- [17] Paiva EM, Jarbas Rohwedder JR, Pasquini C, Pimentel MF, Fernandes Pereira C. Quantification of biodiesel and adulteration with vegetable oils in diesel/biodiesel blends using portable near-infrared spectrometer. Fuel 2015;160:57-63.
- [18] Knothe G, Krah J, Van Gerpen J. The Biodiesel Handbook. 2nd ed. Urbana: AOCS Press, 2010.
- [19] Romano SD, González Suárez E. Biocombustibles Líquidos en Iberoamérica. 1º Ed. Ediciones cooperativas, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2009.

- [20] Gonzalez Prieto LE, Sorichetti PA, Romano SD. Electric properties of biodiesel in the range from 20 Hz to 20 MHz. Comparison with diesel fossil fuel. *International Journal of Hydrogen Energy* 2008;33:3531-3537.
- [21] Arolfo M, Sorichetti PA, Romano SD. Aplicación de Interferometría ultrasónica para la caracterización e metilésteres de origen vegetal. Congreso Iberoamericano HYFUSEN 2011, Mar del Plata.
- [22] Arolfo M. Aplicación de técnicas ultrasónicas para la medición de propiedades de aceites y metilésteres de origen vegetal. Tesis de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, 2013.
- [23] Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Permittivity of biodiesel-rich blends with fossil diesel fuel: Application to biodiesel content estimation. *Fuel* 2016;177:268-273.
- [24] Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Permittivity of diesel fossil fuel and blends with biodiesel in the full range from 0% to 100%: Application to biodiesel content estimation. *Fuel* 2017;188:367-373.
- [25] Romano SD, González Suárez E, Laborde MA. Combustibles alternativos. 2nd ed. Buenos Aires: Ediciones Cooperativas, 2006.
- [26] Romano SD. Biocombustibles líquidos en la Argentina. En *Energía: Investigaciones en América del Sur*. Editorial de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 2017.
- [27] Kung Y, Hsieh B, Cheng T, Huang C, Chen RLC. Impedimetric sensing of the biodiesel contents in diesel fuels with a carbon paste electrode pair. *Fuel* 2012;102:724-728.

- [28] Roy MM, Wang W, Majed Alawi M. Performance and emissions of a diesel engine fueled by biodiesel–diesel, biodiesel–diesel-additive and kerosene–biodiesel blends. *Energy Conversion and Management* 2014;84:164-173.
- [29] ASTM D7371-14, Standard Test Method for Determination of Biodiesel (Fatty Acid Methyl Esters) Content in Diesel Fuel Oil Using Mid Infrared Spectroscopy (FTIR-ATR-PLS Method), 2014.
- [30] Killner MHM, Rohwedder JJR, Pasquini C. A PLS regression model using NIR spectroscopy for on-line monitoring of the biodiesel production reaction. *Fuel* 2011;90:3268-3273.
- [31] Moreira de Lima S,b, Alves Silva BF, Vieira Pontes D, Fernandes Pereira C, Stragevitch L, Pimentel MF. In-line monitoring of the transesterification reactions for biodiesel production using NIR spectroscopy. *Fuel* 2014;115:46-53.
- [32] Zhang W. Review on analysis of biodiesel with infrared spectroscopy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012;16:6048-6058.
- [33] Bezerra de Lira LF, Vera Cruz de Vasconcelos F, Fernandes Pereira C, Silveira Paim AP, Stragevitch L, Pimentel MF. Prediction of properties of diesel/biodiesel blends by infrared spectroscopy and multivariate calibration. *Fuel* 2010;89:405-409.
- [34] Pinzi S, Alonso F, García Olmo J, Dorado MP. Near infrared reflectance spectroscopy and multivariate analysis to monitor reaction products during biodiesel production. *Fuel* 2012;92:354-359.
- [35] Corach J, Sorichetti PA, Romano SD. Electrical and ultrasonic properties of vegetable oils and biodiesel. *Fuel* 2015;139:466-471.
- [36] Scheider JC. Fuel composition and quality sensing for diesel engines. Tesis de Maestría. Universidad de Illinois, Urbana-Champaign, 2011.

- [37] Colman M. Informe de actividades de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, 2017.
- [38] Corach J, Colman M, Sorichetti PA, Romano SD. Kinematic viscosity of soybean biodiesel and diesel fossil fuel blends: Estimation from permittivity and temperature. *Fuel* 2017;207:488-492.
- [39] Ma F, Hanna MA. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology* 1999;70:1-15.
- [40] ASTM D445-17, Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [41] Geacai S, Iulian O, Nita I. Measurement, correlation and prediction of biodiesel blends viscosity. *Fuel* 2015;143:264-274.
- [42] Tat ME, Van Gerpen JH. The Kinematic Viscosity of Biodiesel and Its Blends with Diesel Fuel. *JAOCS* 1999;76(1):1511-1513.
- [43] Ramírez-Verduzco LF, García-Flores BE, Rodríguez-Rodríguez JE, del Rayo Jaramillo-Jacob A. Prediction of the density and viscosity in biodiesel blends at various temperatures. *Fuel* 2011;90:1751-1761.
- [44] Krisnangkura K, Sansa-ard C, Aryusuk K, Lilitchan S, Kittiratanapiboon K. An empirical approach for predicting kinematic viscosities of biodiesel blends. *Fuel* 2010;89:2775-2780.
- [45] Franco Z, Nguyen QD. Flow properties of vegetable oil-diesel fuel blends. *Fuel* 2011;90:838-843.

CAPÍTULO VII: CELDA PARA LA MEDICIÓN DE PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LÍQUIDOS

En este capítulo se describe el proyecto, diseño y construcción de un prototipo de una celda de medición de propiedades eléctricas de líquidos, con electrodos de acero inoxidable. Esta celda presenta varias ventajas respecto a la celda de vidrio con electrodos de platino utilizada previamente en el laboratorio. La mejora en la calidad de la medición hizo posible obtener los datos experimentales del sistema biodiesel/aceite de soja presentados en la sección V.5.

El corte y mecanizado de las piezas de acero y teflón, como también el ensamblado de la celda fue realizado por el Ing. Eriel Fernández Galván, integrante del GER.

VII.1. MOTIVACIÓN

La celda de medición de propiedades eléctricas utilizada para obtener los datos experimentales presentados en las secciones V.1, V.2, V.3 y V.4 es de vidrio y tiene electrodos de platino platinizado. Este tipo de celdas es típica en mediciones de laboratorio, pero presenta importantes desventajas para uso industrial: su costo es alto, el vidrio es un material muy frágil, y los electrodos de platino platinizados se dañan fácilmente, siendo necesario su replatinizado periódico. En consecuencia, estas celdas no son suficientemente robustas para los rigores de la aplicación industrial. Además, el proceso de platinizado es complicado, requiere personal especializado y los proveedores de platino adecuados para ese fin son escasos. Además, para distinguir entre sustancias con valores de permitividad próximos, o bien para detectar cambios pequeños en el valor de la permitividad, es necesario aumentar la capacitancia en vacío de la celda de medición; este es el caso de las mezclas de biodiesel y aceite de soja industriales. En ese sentido, el alto costo del platino limita las superficies de los electrodos, lo cual acota la capacitancia en vacío.

VII.2. CRITERIOS DE DISEÑO

Las características deseables de las celdas de medición de propiedades eléctricas han sido listadas en el capítulo IV [1,2]:

- Bajo costo
- Estabilidad del valor de la capacidad en vacío, C_o
- Valor adecuado de C_o en relación a las muestras a medir y equipos a utilizar
- Durabilidad
- Fácil limpieza
- Fácil armado y desmontaje
- Ausencia de interacción química con los líquidos a medir
- La primera frecuencia de resonancia debe estar muy por encima de la máxima frecuencia de medición
- Debe tener bajas pérdidas

Además, resulta conveniente reducir al mínimo posible el volumen de muestra utilizado. La celda de medición desarrollada en este trabajo fue diseñada considerando dichos criterios de diseño, los cuales son expuestos en las siguientes secciones.

VII.2.1. MATERIALES

Teniendo en cuenta que la celda debe ser robusta y de bajo costo, se optó por utilizar acero inoxidable tanto para los electrodos como para el recipiente portamuestras. Como material aislante se optó por politetrafluoroetileno (PTFE) como guía, sostén y separador aislante de los electrodos de medición. Tanto el acero inoxidable como el PTFE son materiales que se consiguen fácilmente en el mercado local, con buena calidad y a un costo razonable. Si bien el acero al carbono presenta mejores propiedades de mecanizado y tiene costo menor que el acero inoxidable, el último asegura una mayor durabilidad. Para las juntas de la celda se utilizaron O-Rings.

VII.2.2. CONFIGURACIÓN DE LOS ELECTRODOS

Entre las numerosas geometrías posibles para disponer los electrodos de medición, las más utilizadas son la plano paralela, la coaxial y la interdigitada [1,3].

Se escogió la geometría coaxial ya que presenta ventajas en lo que respecta a la fabricación: tanto el mecanizado como el ensamblado de las partes de la celda es más sencillo que en el caso de las geometrías plano paralela o interdigitada. La geometría coaxial permite construir, de manera razonablemente simple, capacitores poco voluminosos con valores relativamente altos de capacidad en vacío. Además, es posible diseñar el conjunto de la celda de modo de reducir el volumen de muestra necesario.

VII.2.3. CONSTANTE DE CELDA Y DIMENSIONAMIENTO

Si una celda de medición con capacitancia en vacío, C_o , es llenada con un dieléctrico de permitividad ε'_r , la variación de capacitancia que presentará la celda, ΔC , es

$$\Delta C = C_o(\varepsilon'_r - 1) \quad (\text{VII.1})$$

En la Ec. VII.1 puede verse que, como la permitividad, ε'_r , es una propiedad intrínseca del dieléctrico, mientras mayor sea la capacitancia en vacío, mayor será la variación de capacitancia eléctrica de la celda llena. En efecto, de la Ec. VII.1 puede verse que, si el sistema de medición permite medir capacitancia con una incerteza δC , la incertidumbre en el valor medido de permitividad es inversamente proporcional a la capacitancia en vacío:

$$\delta \varepsilon'_r = \delta C / C_o \quad (\text{VII.2})$$

Por consiguiente, para detectar variaciones de permitividad pequeñas, como se da en el caso de mezclas de sustancias con valores de permitividad similares, es conveniente aumentar la capacitancia en vacío, C_o .

Como la geometría escogida para los electrodos es coaxial, despreciando los efectos de borde, la capacitancia en vacío de la celda depende del cociente de los radios exterior e interior, y de la longitud del capacitor:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} L \quad (\text{VII.3})$$

donde L es el largo del capacitor, ϵ_0 es la permitividad del vacío en F/m, y a y b son los radios interior y exterior, respectivamente.

En la Figura VII.1 se muestra un esquema de un capacitor coaxial y las dimensiones del mismo.

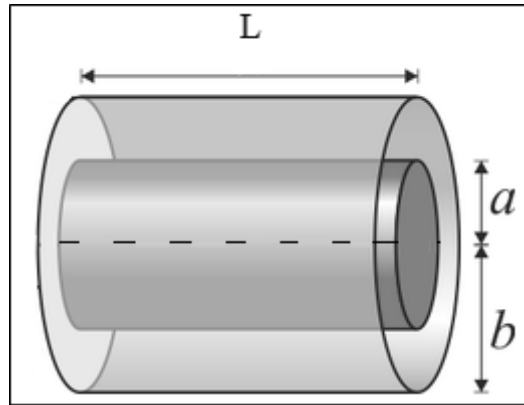


Figura VII.1 - Esquema de un capacitor coaxial ideal.

A partir de la Ec. VII.3, se ve que a medida que la longitud del capacitor sea mayor y/o el cociente entre los radios de los electrodos sea menor, mayor resultará la capacitancia en vacío.

En cuanto al volumen de muestra, aumenta con la longitud L . Como el electrodo interior es sólido, el volumen necesario disminuye si aumenta a . Por otro lado, una distancia excesivamente pequeña entre los electrodos, dificulta considerablemente el mecanizado de las piezas durante su fabricación, el ensamblaje del capacitor durante el armado, y la carga y la limpieza de la celda durante la operación. Por consiguiente, hay que tomar una decisión de compromiso entre la diferencia la capacitancia en vacío y el volumen necesario de muestra. La celda fue dimensionada para obtener una capacitancia en vacío de aproximadamente 20pF y un volumen de muestra de 32ml, y se adoptó una distancia entre los electrodos de 1.25mm. Considerando que la celda de vidrio utilizada previamente en esta tesis requiere 50ml de muestra y tiene una constante de celda de 0.862pF, se ve que la mejora en el desempeño es significativa, pues permite detectar

VII.2.4. DETALLES DE DISEÑO

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	IF de Plano	CANT
1	Recipiente porta muestras	100CM - 001	1
2	Arandela Cierre	100CM - 002	1
3	Tapón de teflon	100CM - 003	1
4	Electrodo Externo	100CM - 004	1
5	Electrodo Interno	100CM - 005	1
6	Arandela PTFE	100CM - 006	6
7	Varilla Electrodo Externo	100CM - 007	3
8	Varilla Electrodo Interior	100CM - 007	3
9	Bomera	100CM - 008	9
10	Conector Electrodo Exterior	100CM - 008	1
11	Conector Electrodo Interior	100CM - 009	1

SEAL

100 CM - 000

100 CM - 000

100 CM - 000

Cada electrodo está soldado a tres varillas que atraviesan el tapón de PTFE. Estas varillas cumplen las funciones de fijación mecánica y conexión eléctrica de los electrodos. El uso de tres varillas por electrodos limita los desplazamientos relativos entre los mismos, asegurando un valor estable de la capacitancia en vacío, C_0 .

El borde inferior del electrodo central se redondeó a fin de evitar que se formen burbujas de aire al cargar las muestras.

El tapón de PTFE tiene dos agujeros: uno para la carga de muestras y otro para la salida del aire. Cuando se trabaja con sustancias volátiles, éstos se cierran con tapones a fin de evitar las pérdidas por evaporación.

Cada una de las seis varillas se sujeta del lado exterior mediante una bornera que hace tope contra el PTFE, a fin de evitar los desplazamientos verticales. Del lado inferior, se colocan arandelas de PTFE alrededor de las varillas con el mismo fin.

Para la conexión eléctrica se utilizó un conector BNC, ya que los mismos son compatibles con gran cantidad de equipos electrónicos.

La celda fue construida por el Ing. Eriel Fernández Galván, integrante del GER (Grupo de Energías Renovables), en el taller del Depto. de Ingeniería Mecánica de la FIUBA.

En la Figura VII.2 se muestra una fotografía del tapón de PTFE ensamblado a los electrodos interior y exterior (lado izquierdo) y del recipiente portamuestra (lado derecho).



Figura VII.2 - Fotografías del tapón de PTFE ensamblado y del recipiente portamuestras de la celda de medición.

En la Figura VII.3 se muestran fotografías de la celda de medición armada.



Figura VII.3 - Celda de medición armada.

VII.3. CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA

Para caracterizar la celda debe determinarse la dependencia de la capacitancia en vacío de la celda en función de la temperatura y de la frecuencia.

En la Figura VII.3 se muestran los resultados experimentales de la parte real de la capacitancia en vacío, C_o , en función de la temperatura de la celda, entre 303K y 343K, a las frecuencias de 1000Hz, 10kHz y 100kHz. Cabe aclarar que los valores reportados corresponden a la capacitancia medida desde el conector coaxial. Por consiguiente, el valor medido corresponde a la capacitancia de la celda en vacío, C_o , más la capacitancia del conector.

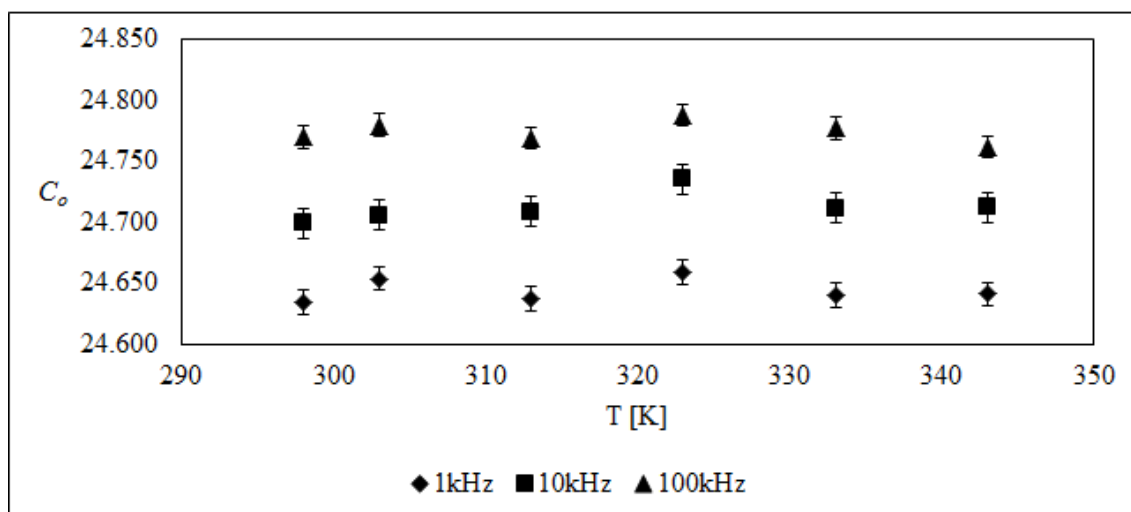


Figura VII.3 – Capacitancia de la celda en función de la temperatura, medida desde el conector.

A partir de la Figura VII.3, se observa que la capacitancia en vacío de la celda varía menos del 0.2% en todo el rango de temperatura, para cada frecuencia de medición.

A fin de verificar que la primera frecuencia de resonancia de la celda de medición está muy por encima de la máxima frecuencia de medición prevista, se realizó un barrido de la capacitancia de la celda entre 10Hz y 30MHz. Además, se verificó que las pérdidas fuesen despreciables en todo el rango de frecuencias.

En las Figuras VII.4 y VII.5 se muestran las partes real e imaginaria de la capacitancia en vacío de la celda de medición entre 10Hz y 30MHz. La leve disminución de la capacidad en vacío observada entre 10kHz y 100kHz, se debe al error sistemático originado por el desfase introducido por los cables de medición [1]. A frecuencias superiores a 100kHz, ese efecto es eliminado por la calibración. Los valores de la capacidad en vacío coinciden muy bien entre los distintos montajes experimentales. Los valores medidos en la proximidad de la frecuencia de 50Hz están afectados por el ruido de línea, y por lo tanto se ignoran a la hora de procesar los datos.

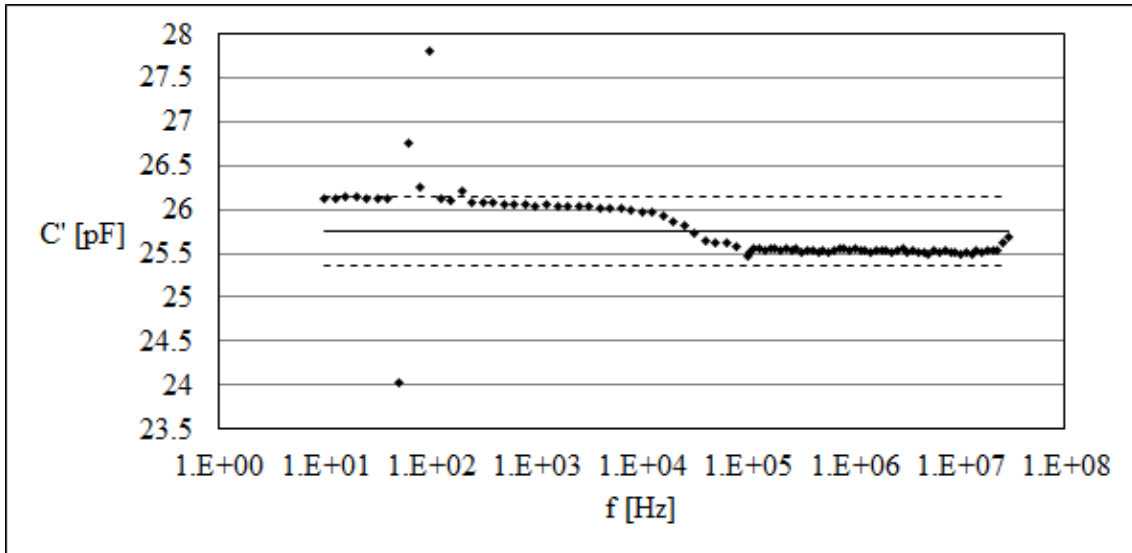


Figura VII.4 - Parte real de la capacitancia en vacío a frecuencias entre 10Hz y 30MHz.

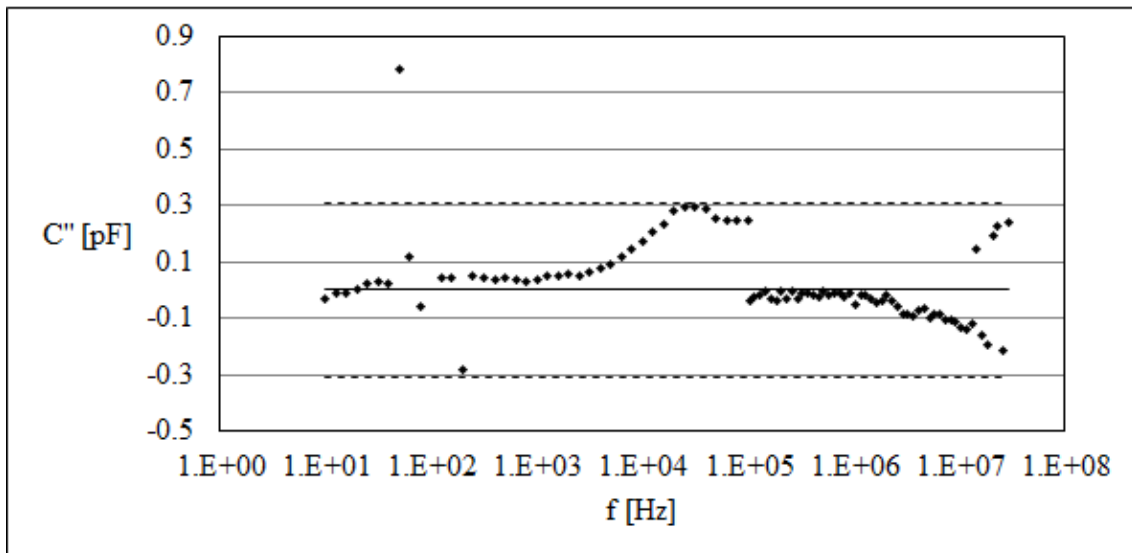


Figura VII.5 - Parte imaginaria de la capacitancia en vacío a frecuencias entre 10Hz y 30MHz.

REFERENCIAS

- [1] Lambri OA, Matteo CL, Mocellini RR, Sorichetti PA, Zelada GI. Propiedades viscoelásticas y eléctricas de sólidos y líquidos. Una introducción a la electro-reología con sus aplicaciones tecnológicas. UNR Editora, Rosario, 2007.

- [2] Sorichetti PA. Técnicas dieléctricas en el estudio de transiciones de fase de fluidos complejos. Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, 2012.

- [3] von Hippel, AR. Dielectrics and waves. John Wiley & Sons, New York, 1954.

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

CONCLUSIONES

En esta tesis se estudiaron las propiedades eléctricas en función de la frecuencia, la temperatura y la composición de los siguientes sistemas:

- aceites vegetales de distintos orígenes
- gasoil
- biodiesel
- mezclas biodiesel de soja/gasoil
- mezclas biodiesel de soja/aceite de soja

La determinación de las propiedades eléctricas se realizó en el rango de frecuencias de 20Hz a 2MHz, y a temperaturas entre 298K y 343K. En el caso de los aceites vegetales y el biodiesel obtenido a partir de los mismos, también se analizaron resultados experimentales de la velocidad del sonido entre 303K y 323K. En el caso del sistema biodiesel/gasoil, se analizaron además resultados experimentales de la viscosidad cinemática entre 303K y 318K.

Dadas las limitaciones observadas en el comportamiento de la celda utilizada inicialmente para las mediciones dieléctricas, se diseñó, construyó y caracterizó una celda de acero para la medición de las propiedades eléctricas apta para uso industrial, que presenta ventajas respecto a las celdas usualmente utilizadas en mediciones de laboratorio. En particular cabe destacar que una mayor capacitancia en vacío (20pF), utiliza menor volumen de muestra (32ml) y es robusta.

A partir de los resultados experimentales se determinaron los rangos típicos de los valores de las propiedades eléctricas y su dependencia con la temperatura, para biodiesel, aceites vegetales, gasoil y las mezclas biodiesel/gasoil y biodiesel/aceite de soja.

En los rangos de frecuencia y temperatura estudiados, la parte real de la permitividad de todas las muestras resulta prácticamente independiente de la frecuencia y linealmente decreciente con la temperatura. Por otro lado, la conductividad depende de la temperatura según una ley de Arrhenius. En particular, se encontró que la energía de activación tiene un valor 0.34eV (chía) y 0.46eV para los aceites, y entre 0.21eV y 0.26eV para el biodiesel.

Asimismo, se presentan correlaciones entre las propiedades eléctricas y otras propiedades de interés, como la composición, la viscosidad cinemática y la velocidad del sonido. Es interesante destacar que tanto las propiedades eléctricas como las acústicas, permiten distinguir entre muestras de aceite vegetal y biodiesel.

Para los sistemas biodiesel/gasoil y biodiesel/aceite de soja, se propusieron modelos matemáticos simples para relacionar las propiedades eléctricas con la temperatura y la composición. Además, en el caso del sistema biodiesel/gasoil, se desarrolló un modelo para estimar la viscosidad cinemática en el rango completo de composición, en función de la permitividad y la temperatura.

Los modelos matemáticos desarrollados para el sistema biodiesel/gasoil permiten estimar la permitividad y la composición de las mezclas con incertidumbres RMS de 1.2% (relativo) y 2.5% (absoluto), respectivamente. Asimismo, se encontró que la energía de activación de la viscosidad cinemática de este sistema sigue una ley de mezcla ideal. A partir de estos resultados, se propuso un modelo para estimar la viscosidad cinemática en el rango completo de composición en función de la permitividad y la temperatura. El error RMS de la estimación fue de $0.02\text{mm}^2\text{s}^{-1}$.

Para el sistema biodiesel/aceite vegetal, el modelo matemático desarrollado permite estimar la permitividad y la composición de las mezclas con incertezas RMS 1% (relativo) y del 6% (absoluto), respectivamente.

Los resultados presentados en esta tesis son relevantes para varios aspectos de la tecnología de biodiesel:

- caracterización en planta y en campo de biodiesel, aceite vegetal, gasoil y sus mezclas
- detección de contaminantes

- diseño de sensores *online*, tanto vehiculares como industriales
- diseño de procesos

PERSPECTIVAS

Los resultados y modelos presentados en esta tesis muestran que las propiedades eléctricas son una herramienta útil para caracterizar biodiesel, gasoil, aceite vegetal y sus mezclas. Además, pueden correlacionarse con otras propiedades de interés, tales como la viscosidad y la velocidad del sonido.

En el caso del sistema biodiesel/gasoil, resulta interesante desarrollar sensores para uso vehicular, con el objetivo final de mejorar la performance del motor a medida que varía la composición del combustible del tanque.

Los resultados obtenidos para el sistema biodiesel/aceite de soja muestran que es posible desarrollar sensores que permitan distinguir entre ambas sustancias a temperaturas próximas a las habituales en las reacciones de transesterificación.

En suma, los resultados obtenidos con la aplicación de las técnicas dieléctricas en esta tesis, abren interesantes posibilidades para extender su uso en otras mezclas de combustibles, tales como etanol-nafta y metanol-nafta.

ANEXO 1: PLATINIZADO DE ELECTRODOS

El platinizado de los electrodos de la celda abierta se llevó a cabo siguiendo el procedimiento indicado en la tesis de la Dra. Mónica Tirado [1].

En primer lugar se prepara una solución de las siguientes características: HCl (0,025N), PbAc₂ (acetato de plomo 0,025% en masa) y PtCl₄ (tetracloruro de platino 0,3% en masa). Luego se cortocircuitan los electrodos a platinizar, se los sumerge en la solución recién mencionada, y se los conecta al terminal negativo de una fuente de corriente. Como cátodo, se utiliza platino de alta pureza (99.9%). En la Figura A.1.1 se muestra un esquema del arreglo experimental.

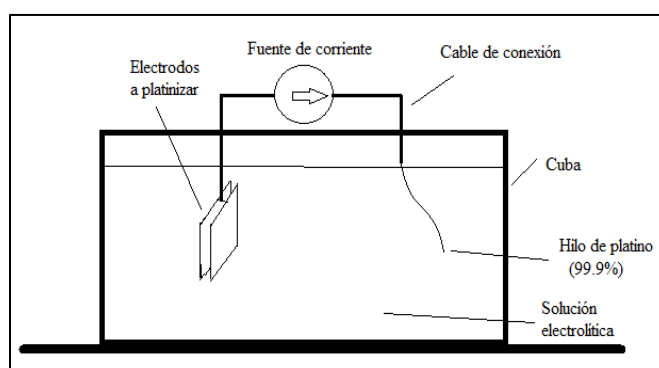


Figura A.1.1 - Esquema experimental para la platinización de los electrodos.

Para que el negro de platino depositado en los electrodos resulte homogéneo, se debe aplicar una densidad de corriente de 300A/m^2 durante 40 minutos. Por otro lado, para obtener una impedancia de polarización mínima, la carga depositada debe ser de 63C/cm^2 [1]. Teniendo en cuenta lo anterior, y dado que la superficie de cada electrodo de la celda con electrodos de platino utilizada en esta tesis es de $6,4\text{cm}^2$, el platinizado llevó a cabo haciendo circular una corriente de aproximadamente 0.2A durante 35 minutos.

REFERENCIAS

[1] Tirado MC. Comportamiento dieléctrico de suspensiones electrolíticas. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Tucumán, 2002.

ANEXO 2: CALIBRACIÓN DE LAS CELDAS DE MEDICIÓN DE PROPIEDADES ELÉCTRICAS

CELDA CON ELECTRODOS DE PLATINO

En la Tabla A.2.1 se muestran los resultados de las mediciones de la parte real e imaginaria de la capacitancia en vacío de la celda con electrodos de platino platinizado, a las frecuencias de 1kHz, 10kHz y 100kHz. El valor indicado a cada frecuencia es el promedio de 30 mediciones.

Capacitancia celda vacía		
Frecuencia [Hz]	C' [pF]	C'' [pF]
1000	30.244	0.045
10000	30.235	0.080
100000	30.244	0.018

Tabla A.2.1 - Capacitancia de la celda con electrodos de platino vacía a 303K.

En la Tabla A.2.1 se muestran los resultados de las mediciones de la parte real e imaginaria de la capacitancia de la celda llena con ciclohexano a 303K, a las frecuencias de 1kHz, 10kHz y 100kHz. El valor indicado a cada frecuencia es el promedio de 30 mediciones.

Capacitancia celda con ciclohexano a 303K		
Frecuencia [Hz]	C' [pF]	C'' [pF]
1000	31.107	0.035
10000	31.093	0.067
100000	31.108	0.024

Tabla A.2.2 - Capacitancia de la celda con electrodos de platino llena con ciclohexano a 303K.

En las Tablas A.2.1 y A.2.2 se observa que los valores de la parte imaginaria de la capacidad, C'' , son despreciables. Haciendo la resta de los valores de C' las Tablas

A.2.2 y A.2.1 y aplicando la Ec. IV.12, se obtienen los valores de la Tabla A.2.3, es decir, la capacitancia de la celda en vacío a cada frecuencia, C_o . El valor de la permitividad del ciclohexano utilizado en la Ec. IV.12 se obtiene de tabla [1].

Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]
1000	0.864
10000	0.858
100000	0.864

Tabla A.2.3 - Capacitancia en vacío de la celda con electrodos de platino.

El valor representativo de la capacitancia en vacío de la celda se estimó como el promedio de los valores de la Tabla A.2.3, y su incerteza como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los desvíos estándar de cada serie de mediciones:

$$C_o = 0.862 \pm 0.003 pF$$

CELDA CON ELECTRODOS DE ACERO

En la Tabla A.2.4 se muestran los resultados de las tres series de mediciones de la parte real e imaginaria de la capacitancia en vacío de la celda con electrodos de acero, a las frecuencias de 1kHz, 10kHz y 100kHz. El valor indicado a cada frecuencia se obtuvo como el promedio de 30 mediciones.

Frecuencia [Hz]	C' [pF]	C'' [pF]	C' [pF]	C'' [pF]	C' [pF]	C'' [pF]
1000	24.627	0.02	24.628	0.02	24.628	0.03
10000	24.717	0.02	24.700	0.05	24.680	0.04
100000	24.735	0.02	24.737	0.02	24.733	0.02

Tabla A.2.4 - Capacitancia en vacío de la celda con electrodos de acero a 293K.

En la Tabla A.2.5 se muestran los resultados de las tres series mediciones de la parte real e imaginaria de la capacitancia de las celda llena con ciclohexano a 293K, a las

frecuencias de 1kHz, 10kHz y 100kHz. El valor indicado a cada frecuencia se obtuvo como el promedio de 30 mediciones.

Frecuencia [Hz]	C' [pF]	C'' [pF]	C' [pF]	C'' [pF]	C' [pF]	C'' [pF]
1000	44.605	0.024	44.608	0.038	44.607	0.036
10000	44.680	0.053	44.665	0.078	44.632	0.142
100000	44.761	0.018	44.759	0.014	44.749	0.016

Tabla A.2.5 - Capacitancia de la celda con electrodos de acero llena con ciclohexano a 293K.

Como en el caso de la celda con electrodos de platino, se observa que los valores de la parte imaginaria de la capacidad, C'' , son despreciables. Haciendo la resta de los valores de C' de las Tablas A.2.4 y A.2.5, y aplicando la Ec. IV.12, se obtienen los valores de la Tabla A.2.6.

Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]
1000	19.978	19.980	19.979
10000	19.964	19.965	19.952
100000	20.026	20.022	20.016

Tabla A.2.6 - Capacitancia en vacío de la celda con electrodos de acero.

El valor representativo de la capacitancia en vacío de la celda se estima utilizando la Ec. IV.12 a partir del promedio de los valores de $\Delta C'$, presentados en la Tabla A.2.6. La incerteza se expresa como el valor RMS:

$$C_o = 19.59 \pm 0.03 pF$$

REFERENCIAS

- [1] Malanowski S, Patz R, Rätzsch MT, Wohlfarth C. Dielectric, Electro-Optical and Thermodynamic Investigation of Binary Mixtures Formed by Pyridine with Hydrocarbons and Chlorobenzene. Fluid Phase Equilibrium 1979; 3:291-312.

ANEXO 3: CALIBRACIÓN DEL CABEZAL TERMOSTÁTICO

La calibración del cabezal termostático se llevó a cabo con el arreglo experimental esquematizado en la Figura A.3.1. En la misma, se observa el termostato a calibrar sumergido en un baño térmico y la sonda de un termómetro electrónico marca Fluke con resolución de 0.001K. La cota de incertidumbre total de calibración del conjunto termómetro+sonda (dentro de dos desvíos estándar) es menor a 20 mK.

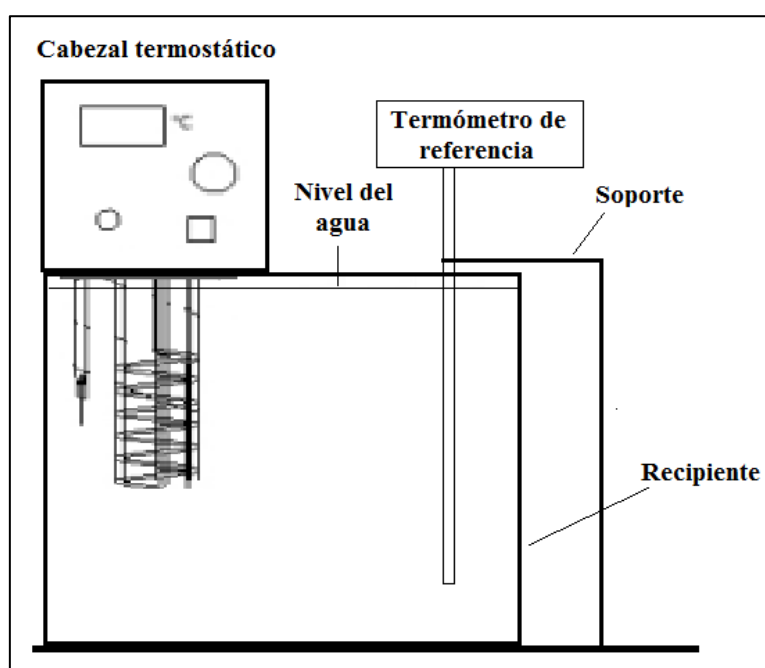


Figura A.3.1 - Esquema experimental para la calibración del cabezal termostático.

En primer lugar se establece una temperatura objetivo en el cabezal termostático a calibrar, $T_{cabezal}$, y se espera que la temperatura del baño se estabilice. Como el termómetro tiene una resolución de 0.001K, se considera que la temperatura del baño es estable cuando las fluctuaciones de la temperatura medida son del orden de la resolución del termómetro. Una vez estabilizada la temperatura del baño, se registra la temperatura medida con el termómetro, $T_{referencia}$. De esta manera se obtienen pares de valores $T_{cabezal}$ versus $T_{referencia}$, con los cuales se realiza una regresión lineal por cuadrados mínimos, tomando como variable conocida la temperatura del termómetro.

Cabe señalar que, si bien el termostato Lauda tiene un display de una décima de K, durante la calibración se verificó que estabiliza la temperatura del baño en el orden de la milésima de K.

En la Tabla A.3.1 se muestran los resultados experimentales de la calibración.

T cabezal [°C]	T termómetro [°C]
24.9	25.600
29.3	29.956
34.3	34.964
39.4	39.938
44.5	44.943
49.6	49.972
54.6	54.957
59.7	59.953
64.7	64.978
69.7	69.983

Tabla A.3.1 - Resultados experimentales de la calibración del cabezal termostático.

En la Figura A.3.2 se muestran los valores experimentales de la Tabla A.3.1 y los resultados de la regresión lineal. Se observa que la linealidad es excelente.

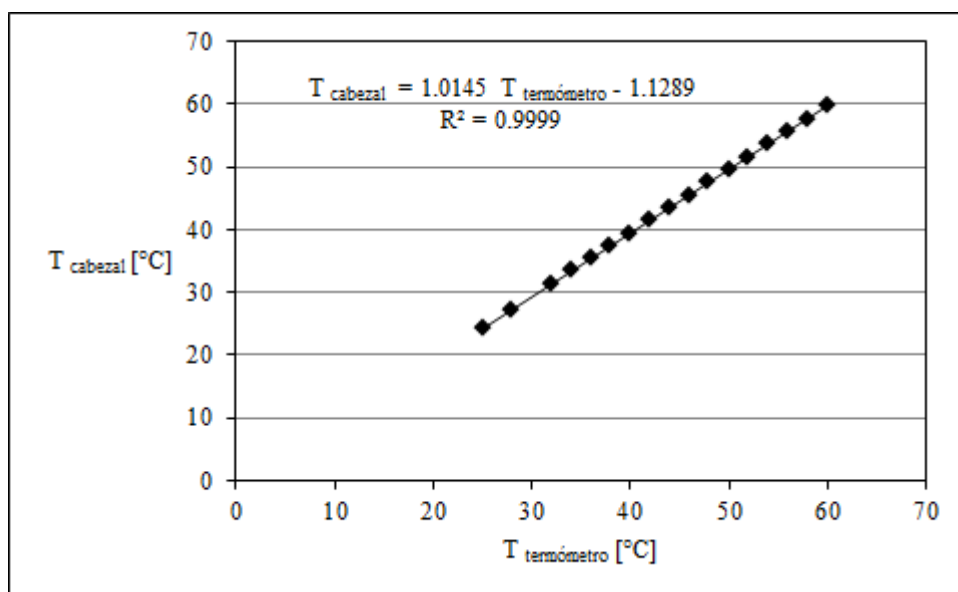


Figura A.3.1 - Temperatura del cabezal termostático versus temperatura del termómetro.

Parámetros de ajuste.

ANEXO 4: ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS

RLC meter Tonghui TH2822c

Function			
Measurement Parameters		Primary: L/C/R/Z/DCR Secondary: D/Q/θ/ESR	
Equivalent Mode		Series, Parallel	
Auto LCR Function		Manual, Auto	
Ranging Mode		Auto	
Test Terminals		3-terminal,5-terminal	
Measurement Speed	LCRZ	4 meas/sec, 1.5meas/sec	
	DCR	3 meas/sec, 2.5meas/sec	
Correction		Short, open	
Tolerance Mode		1%, 5%, 10%, 20%	
Input Protection Fuse		0.1A / 63V	
Interface		Mini-USB (virtual serial port)	
Test Signal			
Signal Frequency (0.02% accuracy)		TH2822 D	100Hz,*120Hz,1kHz,10k Hz
		TH2822 E	100Hz,*120Hz,1kHz,10k Hz,100kHz
Test Signal Level(10% accuracy)		0.3 Vrms、0.6Vrms、1 Vrms DCR signal: 1Vdc	
Output Impedance		100Ω	
Display			
Display		LCD primary-secondary dual display	
Backlight		Battery supply: when backlight is on, luminance is reduced by half 15s later and automatically turned off 30s later. Powered by adapter: backlight off until manually turned off	
Count		Max. Counts of Primary Parameter: 40,000; D / Q / θ Min. resolution of secondary parameter: 0.0001.	
Basic Accuracy		0.1% (see accuracy specifications for details)	
Primary Range and Resolution		See Accuracy Specifications	
Secondary Parameter		Range for Display	Resolution
	ESR	0.0000W -- 999.9Ω	0.0001Ω
	D	0.0000 -- 9.999	0.0001

	Q	0.0000 -- 9999	0.0001
	θ	-179.9° -- 179.9°	0.01°
Power Supply			
Battery Model		LH-200H7C,8.4V Ni-MH 200mA ^h rechargeable battery	
AC Adapter		Input: 220V(1±10%), 50Hz(1±5%) Output: 12V-15V DC	
Operating Current (with backlight off)		Max.:35mA Typical:25mA (@1kHz, 0.6Vrms,100Ω load)	
Standby (Power Off) Current		Max.:11μA	
Battery Life		16 Hours (typical) based on backlight off and new alkaline 6 Hours (typical) based on backlight off and new fully charged Ni-MH battery	
Charge Time and Current		Max.: 160min Max. Current: 100mA	
Auto Power Off (valid for battery powered)		5min/15min/30min/60min/OFF available ; factory default :5min	
Low Voltage Indicator		When battery voltage drops below 6.8V, Low Voltage Indicator turns on	
General			
Operation Condition	Temperature	0℃ -- 40℃	
	Relative Humidity	≤90% R.H.	
Weight		350g	
Dimensions (H * W * D)		190mm *90mm *41mm	
Safety and EMC compliance		IEC 61010-1:2001 IEC 61326-2-1:2005	

Accuracy Specifications

Notices

1. Environment temperature : 23 °C ± 5 °C ;
Humidity: ≤75% R.H.
2. Valid after 10 minutes of warm up time.
3. Test in measuring slots on front panel.
4. Measurements performed after correct open and short correction.
5. Test in the recommended equivalent mode.
6. Percentage discrepancy Indication:
± (%reading+ number of least significant digits)
7. Actual measurement and display range exceed the ranges specified in table, but we do not assign accuracy for measurement values exceeding these ranges.
8. When the test level is 0.3V: accuracy*2
9. Subscript Explanation:

Capacitance(c) and Dissipation (D)

Range		Display Range	Accuracy Ce	Accuracy De*	Recommended Equivalent Mode
100Hz/120Hz	20mF	4.000mF~20.000mF	5.00%+5 digits	±0.0500	Series
	4mF	400.0μF~3.9999mF	1.00%+3 digits	±0.0100	Series
	400μF	40.00μF~399.99μF	0.35%+2 digits	±0.0035	Series
	40μF	4.000μF~39.999μF	0.10%+2 digits	±0.0010	Series
	4μF	400.0nF~3.9999μF	0.10%+2 digits	±0.0010	----
	400nF	40.00nF~399.99nF	0.10%+2 digits	±0.0010	Parallel
	40nF	4.000nF~39.999nF	0.35%+3 digits	±0.0035	Parallel
	4nF	0pF~3.999nF	1.25%+5 digits	-----	Parallel
1kHz	1000μF	400.0μF~999.99μF	2.00%+5 digits	±0.0200	Series
	400μF	40.00μF~399.99μF	1.00%+3 digits	±0.0100	Series

	40μF	4.000μF~39.999μF	0.35%+2 digits	±0.0035	Series
	4μF	400.0nF~3.9999μF	0.10%+2 digits	±0.0010	Series
	400nF	40.00nF~399.99nF	0.10%+2 digits	±0.0010	----
	40nF	4.000nF~39.999nF	0.10%+2 digits	±0.0010	Parallel
	4nF	400.0pF~3.9999nF	0.35%+3 digits	±0.0035	Parallel
	400pF	0.0pF~39.99nF	1.25%+5 digits	-----	Parallel
10kHz	100μF	40.00μF~100.00μF	3.00%+5 digits	±0.0300	Series
	40μF	4.000μF~39.999μF	1.50%+3 digits	±0.0150	Series
	4μF	400.0nF~3.9999μF	0.35%+2 digits	±0.0035	Series
	400nF	40.00nF~399.99nF	0.10%+2 digits	±0.0010	Series
	40nF	4.000nF~39.999nF	0.10%+2 digits	±0.0010	----
	4nF	400.0pF~3.9999nF	0.10%+2 digits	±0.0010	Parallel
	400pF	40.00pF~399.99pF	0.35%+3	±0.0035	Parallel

			digits		
	40pF	0.00pF~39.99pF	1.25%+5 digits	-----	Parallel
100kHz	10μF	4.000μF~10.000μF	6.00%+20 digits	±0.0600	Series
	4μF	400.0nF~3.9999μF	2.50%+10 digits	±0.0250	Series
	400nF	40.00nF~399.99nF	0.80%+5 digits	±0.0080	Series
	40nF	4.000nF~39.999nF	0.50%+2 digits	±0.0050	Series
	4nF	400.0pF~3.9999nF	0.50%+2 digits	±0.0050	-----
	400pF	40.00pF~399.99pF	0.80%+2 digits	±0.0080	Parallel
	40pF	4.000pF~39.999pF	1.20%+5 digits	±0.0120	Parallel
	4pF	0.000pF~4.999pF	3.00%+10 digits	-----	Parallel



Appendix A: Specifications

All specifications apply to the TDS 210 and TDS 220 with a P6112 probe unless noted otherwise. To meet specifications, two conditions must first be met:

- The instrument must have been operating continuously for ten minutes within the specified operating temperature.
- You must perform the Self Cal operation, accessible through the utility menu, if the operating temperature changes by more than 5° C.

All specifications are guaranteed unless noted “typical.”

Specifications

Acquisition		
Acquisition Modes	Sample, Peak detect, and Average	
Acquisition Rate, typical	Up to 180 waveforms per second (2 channels, sample acquisition mode, no measurements)	
Single Sequence	Acquisition Mode	Acquisition Stops After
	Sample, Peak Detect	Single acquisition, one or two channels simultaneously
	Average	N acquisitions, one or two channels simultaneously, N is selectable from 4, 16, 64, and 128

Specifications (Cont.)

Inputs		
Input Coupling	DC, AC, or GND	
Input Impedance, DC Coupled	1 M Ω \pm 2% in parallel with 20 pF \pm 3 pF	
P6112 Probe Attenuation	10X	
Maximum Voltage Between Signal and Common at input BNC	<i>Overvoltage Category</i>	<i>Maximum Voltage</i>
	CAT I and CAT II	300 V _{RMS}
	For steady-state sinusoidal waveforms, derate at 20 dB/decade above 100 kHz to 13 V _{pk} at 3 MHz and above. Also, refer to Overvoltage Category description on page 53.	
Maximum Voltage Between Probe Tip and ground using P6112 connected to input BNC	<i>Overvoltage Category</i>	<i>Maximum Voltage</i>
	CAT I and CAT II	300 V _{RMS}
	Derate at 20 dB/decade above 900 kHz to 13 V _{RMS} at 27 MHz and above. Also, refer to Overvoltage Category description on page 53.	
Channel-to-Channel Common Mode Rejection, typical	<i>TDS 210</i>	<i>TDS 220</i>
	100:1 at 60 Hz 20:1 at 30 MHz	100:1 at 60 Hz 20:1 at 50 MHz
	Measured on MATH Ch1 – Ch2 waveform, with test signal applied between signal and common of both channels, and with the same VOLTS/DIV and coupling settings on each channel.	
Channel-to-Channel Crosstalk	<i>TDS 210</i>	<i>TDS 220</i>
	\geq 100:1 at 30 MHz	\geq 100:1 at 50 MHz
	Measured on one channel, with test signal applied between signal and common of the other channel, and with the same VOLTS/DIV and coupling settings on each channel.	

Appendix A: Specifications

Specifications (Cont.)

Vertical		
Digitizers	8 bit resolution, each channel sampled simultaneously	
VOLTS/DIV Range	2 mV/div to 5 V/div at input BNC (Full bandwidth at > 5 mV/div to 5 V/div, 20 MHz at 2 mV/div to 5 mV/div)	
Position Range	2 mV/div to 200 mV/div, ± 2 V > 200 mV/div to 5 V/div, ± 50 V	
Analog Bandwidth at BNC or with P6112, probe DC Coupled	<i>TDS 210</i>	<i>TDS 220</i>
	60 MHz	100 MHz
Peak Detect Bandwidth, typical	<i>TDS 210</i>	<i>TDS 220</i>
	50 MHz (5 s/div to 5 μ s/div) (20 MHz at 2 mV/div to 10 mV/div)	75 MHz (5 s/div to 5 μ s/div) (20 MHz at 2 mV/div to 10 mV/div)
Analog Bandwidth Limit, typical	Selectable between 20 MHz or full	
Lower Frequency Limit, AC Coupled	≤ 10 Hz at BNC	
	≤ 1 Hz when using a 10X passive probe	
Rise Time at BNC, typical	<i>TDS 210</i>	<i>TDS 220</i>
	<5.8 ns	<3.5 ns
Peak Detect Response	Captures 50% or greater amplitude of pulses ≥ 10 ns wide (5 s/div to 5 μ s/div)	
DC Gain Accuracy	$\pm 3\%$ for Sample or Average acquisition mode	

Specifications (Cont.)

Vertical		
DC Measurement Accuracy, Average Acquisition Mode	<i>Measurement Type</i>	<i>Accuracy</i>
	Average of ≥ 16 waveforms with vertical position at zero	$\pm(3\% \times \text{reading} + 0.1 \text{ div} + 1 \text{ mV})$
	Average of ≥ 16 waveforms with vertical position not at zero	$\pm[3\% \times (\text{reading} + \text{vertical position}) + 1\% \text{ of vertical position} + 0.2 \text{ div}]$ Add 2 mV for settings from 2 mV/div to 200 mV/div. Add 50 mV for settings from >200 mV/div to 5 V/div.
Delta Volts Measurement Accuracy, Average Acquisition Mode	Delta volts between any two averages of ≥ 16 waveforms acquired under same setup and ambient conditions	$\pm(3\% \times \text{reading} + 0.05 \text{ div})$
Horizontal		
Sample Rate Range	50 S/s to 1 GS/s	
Record Length	2500 samples for each channel	
SEC/DIV Range	5 ns/div to 5 s/div, in a 1, 2.5, 5 sequence	
Sample Rate and Delay Time Accuracy	$\pm 100 \text{ ppm}$ over any $\geq 1 \text{ ms}$ time interval	
Delta Time Measurement Accuracy (Full Bandwidth)	<i>Conditions</i>	<i>Accuracy</i>
	Single-shot, sample mode	$\pm(1 \text{ sample interval} + 100 \text{ ppm} \times \text{reading} + 0.6 \text{ ns})$
	> 16 averages	$\pm(1 \text{ sample interval} + 100 \text{ ppm} \times \text{reading} + 0.4 \text{ ns})$
	Sample interval = $s/\text{div} \div 250$	
Position Range	5 ns/div to 10 ns/div	$(-4 \text{ div} \times s/\text{div})$ to 20 ms
	25 ns/div to 100 $\mu\text{s}/\text{div}$	$(-4 \text{ div} \times s/\text{div})$ to 50 ms
	250 $\mu\text{s}/\text{div}$ to 5 s/div	$(-4 \text{ div} \times s/\text{div})$ to 50 s

Appendix A: Specifications

Specifications (Cont.)

Trigger			
Trigger Sensitivity, Edge Trigger Type	Coupling	Sensitivity	
	DC	CH 1 and CH 2	1 div from DC to 10 MHz, 1.5 div from 10 MHz to Full
		EXT	100 mV from DC to 10 MHz, 150 mV from 10 MHz to Full
		EXT/5	500 mV from DC to 10 MHz, 750 mV from 10 MHz to Full
Trigger Sensitivity, Edge Trigger Type, typical	Coupling	Sensitivity	
	NOISE REJ	Reduces the DC-coupled trigger sensitivity by 2 times for > 10 mv/div to 5 V/div	
	HF REJ	Same as the DC-coupled limit from DC to 7 kHz, attenuates signals above 80 kHz	
	LF REJ	Same as the DC-coupled limits for frequencies above 300 kHz, attenuates signals below 300 kHz	
Trigger Level Range	Source	Range	
	Internal	±8 divisions from center of screen	
	EXT	±1.6 V	
	EXT/5	±8 V	
Trigger Level Accuracy, typical	Accuracies are for signals having rise and fall times ≥20 ns		
	Source	Accuracy	
	Internal	±0.2 div × volts/div within ±4 divisions from center screen	
	EXT	±(6% of setting + 40 mV)	
	EXT/5	±(6% of setting + 200 mV)	

Specifications (Cont.)

Trigger		
SET LEVEL TO 50%, typical	Operates with input signals ≥ 50 Hz	
Sensitivity, Video Trigger Type, typical	Composite video signal	
	Source	Range
	Internal	Pk-pk amplitude of 2 divisions
	EXT	400 mV
	EXT/5	2 V
Signal Formats and Field Rates, Video Trigger Type	Supports NTSC, PAL, and SECAM broadcast systems for any field or any line	
Holdoff Range	500 ns to 10 s	
Measurements		
Cursors	Voltage difference between cursors (ΔV)	
	Time difference between cursors (ΔT)	
	Reciprocal of ΔT in Hertz ($1/\Delta T$)	
Automated Measurements	Cycle RMS, Mean, Pk – Pk, Period, Frequency	

Appendix A: Specifications

General Specifications

Display		
Display Type	5.7 in. (145 mm) diagonal liquid crystal	
Display Resolution	320 horizontal by 240 vertical pixels	
Display Contrast	Adjustable, temperature compensated	
Backlight Intensity, typical	35 cd/m ²	
Probe Compensator Output		
Output Voltage, typical	5 V into ≥1 MΩ load	
Frequency, typical	1 kHz	
Power Source		
Source Voltage	90 – 250 VAC _{RMS} from 45 through 440 Hz, CAT II	
Power Consumption	Less than 20 W	
Fuse	1 A, T rating, 250 V	
Environmental		
Temperature	Operating	0° C to +50° C
	Nonoperating	–20° C to +60° C
Cooling Method	Convection	
Humidity	+40° C or below	≤90% relative humidity
	+41° C to +50° C	≤60% relative humidity
Altitude	Operating	2,000 m
	Nonoperating	15,000 m

General Specifications (Cont.)

Environmental		
Random Vibration	Operating	0.31 g _{RMS} from 5 Hz to 500 Hz, 10 minutes on each axis
	Nonoperating	2.46 g _{RMS} from 5 Hz to 500 Hz, 10 minutes on each axis
Mechanical		
Size	Height	151.4 mm (5.96 in.)
	Width	304.8 mm (12 in.)
	Depth	120.7 mm (4.75 in.)
Weight (approximate)	When packaged for domestic shipment	3.06 kg (6.75 lbs)

Appendix A: Specifications

General Specifications (Cont.)

Certifications and Compliances	
EC Declaration of Conformity	Meets intent of Directive 89/336/EEC for Electromagnetic Compatibility and Low-Voltage Directive 73/23/ECC as amended by 93/68/EEC for Product Safety. Compliance was demonstrated to the following specifications as listed in the Official Journal of the European Communities:
(TDS 210, TDS 220)	EN 50081-1 Emissions: EN 55011 Class A Radiated and Conducted Emissions EN 60555-2 AC Power Line Harmonic Emissions EN 50082-1 Immunity: IEC 801-2 Electrostatic Discharge Immunity IEC 801-3 RF Electromagnetic Field Immunity IEC 801-4 Electrical Fast Transient/Burst Immunity IEC 801-5 Power Line Surge Immunity
(TDS 210, TDS 220, P6112)	Low Voltage Directive 73/23/EEC as amended by 93/68/EEC: EN 61010-1/A2:1995 Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use
(P6112)	EN 61010-2-031:1994 Particular requirements for hand-held probe assemblies for electrical measurement and test
Certifications (TDS 210, TDS 220, P6112)	CAN/CSA C22.2 No. 1010.1-92 UL3111-1, First Edition
(P6112)	IEC61010-1/A2 IEC61010-2-031
CSA Certified Power Cords	CSA Certification includes the products and power cords appropriate for use in the North America power network. All other power cords supplied are approved for the country of use.
Pollution Degree 2	Do not operate in environments where conductive pollutants may be present.

General Specifications (Cont.)

Certifications and Compliances

Overvoltage Category	Category:	Examples of Products in this Category:
	CAT III	Distribution-level mains, fixed installation
	CAT II	Local-level mains, appliances, portable equipment
	CAT I	Signal levels in special equipment or parts of equipment, telecommunications, electronics

Adjustment Interval

The recommended calibration interval is one year

Termómetro Fluke 1521

Specifications

Resistance Range	0 Ω to 500 k Ω
Resistance Accuracy, PRT, one year†	0 Ω to 25 Ω : 0.002 Ω 25 Ω to 400 Ω : 0.008% (80 ppm) of reading
Resistance Accuracy, thermistor, one year†	0 Ω to 2 k Ω : 0.4 Ω 2 k Ω to 200 k Ω : 0.02% (200 ppm) of reading 200 k Ω to 500 k Ω : 0.03% (300 ppm) of reading
Temperature Range	PRT: -200°C to 962°C (-328°F to 1764°F) Thermistor: -50°C to 150°C (-58°F to 302°F)
Temperature Accuracy, PRT†	-200°C to 100°C: $\pm 0.025^{\circ}\text{C}$ (0.045°F) 100°C to 400°C: $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ (0.09°F) 400°C to 800°C: $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ (0.18°F) 800°C to 962°C: $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ (0.27°F)
Temperature Accuracy, 2.25 k Ω thermistor†	-50 to 25°C: $\pm 0.005^{\circ}\text{C}$ (0.009°F) 25°C to 50°C: $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ (0.018°F) 50°C to 75°C: $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$ (0.054°F) 75°C to 100°C: $\pm 0.08^{\circ}\text{C}$ (0.144°F)
Temperature Accuracy, 10 k Ω thermistor†	0 to 50°C: $\pm 0.005^{\circ}\text{C}$ (0.009°F) 50°C to 75°C: $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ (0.018°F) 75°C to 100°C: $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ (0.036°F) 100°C to 125°C: $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ (0.09°F) 125°C to 150°C: $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ (0.18°F)
Temperature Accuracy, 100 k Ω thermistor†	0 to 50°C: 0.006°C (0.011°F) 50°C to 150°C: 0.009°C (0.016°F)
Resistance Resolution	0.001 Ω
Temperature Resolution	0.001°C, F, K, R
Probe	IEC-751 or DIN-43760 PRT Callendar-Van Dusen calibrated PRT; nominal 100 Ω ITS-90 calibrated 25 Ω or 100 Ω PRT YSI-400 series or equivalent 2252 Ω thermistor Steinhart-Hart thermistor polynomial; nominal R(25°C) 2k Ω to 100k Ω
Probe Connector	Hart Scientific INFO-CON connector
Maximum Acceptable Probe Lead Resistance	10 Ω
Probe Excitation Current	PRT: 0.5 mA Thermistor: 5 μ A
Measurement Period	1 second

ANEXO 5: RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este anexo se presentan los valores medidos de la parte real e imaginaria de $\Delta C(\omega)$ a cada temperatura de las muestras de aceites vegetales, biodiesel, gasoil y mezclas estudiadas. Los valores negativos en la parte imaginaria de $\Delta C(\omega)$ se deben al ruido en la medición.

BIODIESEL DE GIRASOL

	300K		303K		313K		323K		333K		343K	
Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
21.13	2.51848	0.13032	2.59362	0.14808	2.50484	0.229	2.53763	0.30373	2.47728	0.36275	2.37466	0.44697
26.6	2.59	0.13023	2.59582	0.11088	2.51827	0.17058	2.58268	0.18275	2.3098	0.25975	2.36912	0.33023
33.49	2.61815	-2E-05	2.60601	0.06179	2.52536	0.13492	2.47268	0.11591	2.40854	0.18503	2.29547	0.26638
42.16	2.56675	0.10853	2.61808	0.1128	2.53874	0.13668	2.48703	0.17487	2.40574	0.20667	2.35344	0.2182
53.08	2.57777	0.08195	2.59985	0.08594	2.54149	0.0841	2.49724	0.12359	2.41097	0.15726	2.34527	0.18173
66.83	2.5888	0.05537	2.58163	0.05908	2.54424	0.03152	2.50745	0.07231	2.4162	0.10785	2.33709	0.14527
84.13	2.60014	0.06477	2.57198	0.06798	2.51785	0.06198	2.53069	0.09208	2.44067	0.097	2.38678	0.09361
105.92	2.55771	0.00555	2.63847	0.01885	2.55291	0.07048	2.49583	0.08639	2.41222	0.02319	2.37674	0.04456
133.35	2.54585	-0.013	2.61441	0.0348	2.54929	0.00844	2.51824	0.06397	2.41978	0.03428	2.35135	0.08176
167.88	2.58229	0.03259	2.58051	0.06131	2.54821	0.02262	2.48323	0.04422	2.41673	0.08551	2.35308	0.06399
211.35	2.64001	0.0211	2.58946	-0.0011	2.51832	0.02024	2.43178	-0.0205	2.39929	-5E-05	2.34708	0.0407
266.07	2.56927	0.04675	2.60493	0.02252	2.5301	0.01024	2.46748	0.0431	2.36441	0.00886	2.31997	0.02041
334.96	2.58262	0.08467	2.52612	0.04695	2.49655	0.02777	2.4535	0.07256	2.44516	0.01344	2.36913	0.05194
421.69	2.6206	1.98E-02	2.59463	1.38E-02	2.51402	4.77E-03	2.46937	0.05802	2.41429	3.81E-02	2.37877	7.84E-02
530.88	2.63848	0.00753	2.60406	0.01962	2.59458	0.01658	2.49675	0.03937	2.45367	-0.0004	2.37657	0.00228
668.34	2.5543	0.03277	2.595	0.04779	2.52427	0.0017	2.4506	-0.024	2.40918	0.04583	2.33836	0.04346
841.39	2.57039	0.01478	2.55596	0.08672	2.56544	0.04218	2.46285	0.05353	2.36156	0.05156	2.29923	0.04787
1059.25	2.55682	0.02391	2.59932	-0.0073	2.55991	0.02792	2.4533	0.0172	2.40316	0.07155	2.37768	0.042
1333.52	2.59313	0.03476	2.59746	0.04542	2.50849	0.04312	2.47492	0.03597	2.3663	0.01519	2.34918	0.03591
1678.81	2.53523	0.0352	2.58416	0.01668	2.52626	0.01259	2.47414	0.01107	2.3813	0.02961	2.3755	0.06265
2113.5	2.59956	0.06328	2.55773	0.04417	2.54071	0.00823	2.48455	0.07294	2.43359	0.03649	2.34386	0.06971
2660.73	2.57117	0.0137	2.58964	0.03743	2.52794	0.03068	2.48013	0.0274	2.41918	0.06347	2.36541	0.01719
3349.67	2.50644	-0.0108	2.53908	0.00451	2.4511	0.02199	2.43629	0.01206	2.38928	0.02315	2.37979	0.02773
4216.98	2.56028	0.00914	2.56499	-0.0238	2.51485	0.02385	2.43683	0.0288	2.40104	0.03121	2.33855	0.04073
5308.87	2.54078	-0.0277	2.49931	0.01033	2.50189	-0.0034	2.44112	0.009	2.37151	0.0007	2.30298	0.02331
6683.47	2.61218	0.02502	2.58924	-0.0003	2.5212	0.01622	2.37923	-0.0005	2.39962	0.03686	2.29632	0.02503
8413.99	2.54709	0.06816	2.56047	0.0095	2.47916	0.00545	2.47571	-0.0242	2.36044	0.00454	2.29941	0.00457
10592.59	2.52111	-0.0321	2.53463	0.03418	2.52384	0.02945	2.4982	0.06206	2.34538	0.0538	2.32854	0.09735
13335.28	2.55998	0.00038	2.55577	-0.0168	2.44354	-0.0103	2.4843	0.03691	2.3866	-0.0115	2.37121	-0.0112
16788.12	2.50928	0.02398	2.52136	0.0055	2.47866	0.02353	2.41137	0.0065	2.38664	0.01869	2.38962	0.00226
21135	2.59426	-0.0247	2.55327	-0.0329	2.49001	-0.0515	2.4228	0.00427	2.39413	0.02765	2.3294	-0.0183
26607.38	2.49747	0.05357	2.54216	0.01457	2.48589	-0.0568	2.42024	-0.0144	2.34851	-0.0499	2.30604	0.02392
33496.71	2.58289	0.01824	2.61932	-0.0085	2.45876	0.00208	2.44038	-0.0004	2.35302	-0.0229	2.33671	0.00697
42169.86	2.61077	0.01983	2.59278	0.00671	2.54539	-0.0091	2.46106	0.02825	2.46306	0.02767	2.32716	0.04399
53088.71	2.51434	0.04257	2.51222	0.01809	2.49247	0.01863	2.37784	0.03745	2.35418	0.0272	2.28597	0.02215
66834.73	2.51562	0.04132	2.56471	0.00863	2.46718	0.01834	2.38263	0.06857	2.3064	0.02659	2.28333	0.0525
84139.95	2.54421	0.02194	2.61365	0.04294	2.44976	0.01151	2.42546	0.02305	2.35203	0.02814	2.31052	-0.0256
105925.92	2.50682	-0.032	2.53403	0.01768	2.48064	-0.0146	2.37896	-0.0246	2.38177	0.02071	2.28581	-0.0116
133352.83	2.52378	0.07076	2.50513	0.06988	2.50395	0.0492	2.46006	-0.0239	2.45368	0.02028	2.35807	-0.0034
167881.27	2.48889	0.06303	2.51952	-0.0042	2.44352	0.03736	2.37429	0.00874	2.32446	0.00058	2.27957	0.06553
211349.99	2.56446	0.0674	2.49395	0.03589	2.46307	0.03241	2.3726	-0.0207	2.37075	0.01348	2.34866	0.02695
266073.88	2.51848	0.01169	2.5547	0.00203	2.45518	0.04084	2.39436	-0.0031	2.38256	0.04256	2.30586	0.04805
334967.17	2.52317	0.02712	2.46223	0.00801	2.44486	0.02312	2.3569	0.02459	2.35156	-0.0156	2.28163	0.01128
421698.69	2.51827	0.00152	2.51057	0.01558	2.43765	0.0174	2.41349	0.02183	2.3401	-0.0074	2.28402	0.00971
530887.19	2.50234	-0.029	2.55807	-0.0222	2.47888	0.02956	2.39593	-0.0267	2.39154	-0.0388	2.29544	0.02086
668347.38	2.54432	0.02301	2.5618	0.0089	2.45575	-0.0003	2.39072	-0.0063	2.35454	-0.004	2.30561	-0.005
841399.5	2.54416	-0.0515	2.51732	-0.0285	2.43844	0.01466	2.44738	-0.0257	2.34597	-0.0044	2.30183	0.03638
1059259.21	2.50267	0.01949	2.53208	0.02284	2.48571	-0.0091	2.45701	0.02602	2.36151	0.00801	2.27406	0.00204
1333528.34	2.57605	0.04864	2.62192	-0.0329	2.50852	0.0328	2.47595	-0.0062	2.33732	0.01376	2.34494	0.01972
1678812.72	2.50279	0.04075	2.52136	0.06221	2.44627	0.00559	2.41985	0.05954	2.32119	-0.0124	2.31549	0.01663
2113499.99	2.56511	0.02563	2.52609	0.05201	2.46309	0.03272	2.42517	0.02293	2.3493	0.02461	2.31283	0.03788

BIODIESEL DE OLIVA

	300K		303K		313K		323K		333K		343K	
Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
21.13	2.55509	0.091334	2.53704	0.02793	2.54634	0.131689	2.40623	0.12963	2.35275	0.26933	2.32156	0.21181
26.6	2.59696	0.027702	2.46854	0.04958	2.57728	0.05491	2.42329	0.10267	2.38957	0.12734	2.24442	0.18354
33.49	2.48923	-0.05787	2.46049	0.00118	2.49088	0.07388	2.39097	0.06792	2.23348	0.0472	2.22811	0.15383
42.16	2.59745	-0.0225	2.49651	0.06889	2.44709	0.060961	2.50937	0.02928	2.29023	0.07826	2.24074	0.04895
53.08	2.57373	-0.00133	2.53138	0.0565	2.45031	0.047366	2.45485	0.01902	2.31972	0.05239	2.24244	0.04983
66.83	2.55001	0.019836	2.56625	0.04411	2.45353	0.03377	2.40032	0.00875	2.34922	0.02651	2.24413	0.05071
84.13	2.59816	0.022737	2.50321	-0.0637	2.41273	0.032911	2.41785	0.0354	2.32998	0.05454	2.23139	0.03693
105.92	2.55674	-0.02754	2.52489	0.02519	2.4445	0.03237	2.3545	-0.0175	2.34316	-0.0042	2.1769	0.05634
133.35	2.56785	-0.04124	2.5836	-0.0076	2.4659	-0.00052	2.39902	0.0207	2.35	-0.0121	2.24762	0.02578
167.88	2.54445	-0.04289	2.49081	0.08384	2.42233	-0.04841	2.39569	0.00421	2.33399	0.01934	2.30711	0.01312
211.35	2.58623	-0.02193	2.52642	-0.055	2.47754	-0.052	2.42372	0.01047	2.40243	-0.0071	2.3138	-0.0485
266.07	2.59852	0.020133	2.52923	0.04176	2.50338	-0.00679	2.44055	0.02238	2.48636	0.02251	2.26671	-0.036
334.96	2.54921	0.078953	2.47809	-0.0127	2.41655	0.115488	2.35768	0.02592	2.27303	0.05369	2.25531	0.06425
421.69	2.57418	-3.63E-02	2.57138	2.52E-02	2.46852	-4.43E-02	2.46912	-0.0473	2.30107	1.73E-03	2.28015	2.48E-02
530.88	2.5908	-0.01327	2.60885	-0.0539	2.43035	0.017175	2.39173	-0.0318	2.36283	0.00302	2.2996	-0.0387
668.34	2.57297	0.043791	2.53774	0.04701	2.44282	0.055157	2.38078	-0.0141	2.33718	0.03825	2.31821	0.04752
841.39	2.56769	-0.0445	2.57855	-0.0015	2.45235	0.00127	2.43703	0.01419	2.37654	0.03717	2.27752	0.01103
1059.25	2.5623	0.043782	2.55055	0.05082	2.53836	-0.00295	2.36168	-0.0122	2.34165	0.04869	2.25068	0.06108
1333.52	2.57015	0.03767	2.54691	0.04627	2.47106	0.072615	2.36273	0.03882	2.34615	0.04555	2.26058	0.01331
1678.81	2.60114	-0.01665	2.52567	0.01688	2.48245	-0.02066	2.38692	-0.0123	2.37361	0.00526	2.31631	0.03297
2113.5	2.52649	0.015918	2.54572	0.02065	2.50516	0.008747	2.46206	0.06403	2.31798	-0.0019	2.30509	0.09061
2660.73	2.52415	0.018774	2.53095	0.03341	2.46163	0.028746	2.46216	0.00177	2.36606	0.01109	2.30312	0.02966
3349.67	2.56857	0.022193	2.56579	-0.0124	2.49275	0.019716	2.43335	0.02949	2.41343	-0.0116	2.30281	0.05544
4216.98	2.56914	0.043253	2.52565	0.05249	2.41995	-0.00715	2.37158	0.03392	2.41676	0.05493	2.27739	0.01962
5308.87	2.52955	0.044772	2.49309	0.05235	2.47813	-0.0042	2.33783	0.06115	2.34953	0.05118	2.3275	0.0679
6683.47	2.56711	-0.01309	2.58169	0.01617	2.46702	-0.03187	2.4435	-0.0456	2.36372	0.02982	2.26378	0.04365
8413.99	2.5003	0.041523	2.52132	0.04167	2.50542	0.045084	2.37935	0.06562	2.33335	0.09096	2.21482	0.02611
10592.59	2.47915	-0.03203	2.55659	-0.031	2.46637	-0.03431	2.35525	-0.0015	2.25274	-0.071	2.22586	0.02033
13335.28	2.54376	0.0655	2.52864	-0.0424	2.44132	0.052894	2.36598	0.03633	2.27242	0.10185	2.23729	0.01106
16788.12	2.54708	0.018387	2.55473	-0.0125	2.38505	0.009866	2.41899	-0.0027	2.31489	0.04049	2.28553	-0.0125
21135	2.50661	0.015064	2.46224	-0.0004	2.38952	0.006688	2.34918	0.03601	2.2795	-0.0524	2.22787	0.01777
26607.38	2.52143	-0.0692	2.51816	0.03967	2.47087	0.142831	2.4162	0.04803	2.30488	-0.0362	2.24898	0.05707
33496.71	2.47707	0.012871	2.48086	-0.0242	2.42757	0.038744	2.33908	0.02876	2.29356	0.05033	2.25227	-0.0219
42169.86	2.54364	-0.03783	2.48178	-0.0169	2.43041	-0.00299	2.34678	0.03341	2.297	0.04581	2.27314	0.04703
53088.71	2.55875	0.08213	2.53586	0.03503	2.47016	0.026995	2.42669	0.05914	2.37806	-0.0231	2.28554	0.0084
66834.73	2.47661	0.012538	2.52525	-0.012	2.44478	-0.01837	2.37696	-0.0429	2.30293	-0.0146	2.24796	-0.0142
84139.95	2.60101	0.052092	2.56735	-0.0151	2.54825	0.008115	2.39399	-0.0346	2.29914	-0.0085	2.35753	-0.0133
105925.92	2.52074	-0.00756	2.45764	-0.0034	2.41009	-0.04795	2.42035	0.02832	2.30099	-0.0077	2.21435	0.02106
133352.83	2.53724	-0.01102	2.49667	0.04397	2.43116	0.00658	2.35115	0.00213	2.26904	0.06218	2.18126	0.02795
167881.27	2.49276	-0.08025	2.47925	-0.0332	2.46375	0.000567	2.30389	-0.0401	2.33973	-0.0895	2.22525	-0.0347
211349.99	2.47718	-0.01183	2.45602	-0.0466	2.4456	-0.02645	2.42629	-0.0118	2.31356	-0.0314	2.24456	-0.0498
266073.88	2.54566	0.047702	2.50753	0.03696	2.49533	0.009795	2.3595	0.0265	2.34335	0.01498	2.24888	0.07297
334967.17	2.53544	-0.00983	2.50951	-0.0249	2.44034	0.046196	2.38648	0.0135	2.33261	-0.0557	2.27323	0.00346
421698.69	2.51302	0.013442	2.45492	-0.064	2.41887	0.009723	2.39677	0.00052	2.28458	-0.0283	2.22605	0.03082
530887.19	2.55239	0.010219	2.52599	-0.0377	2.4124	-0.01199	2.43635	0.00966	2.33133	0.00389	2.23461	-0.009
668347.38	2.50916	-0.02071	2.56386	-0.024	2.4601	-0.06342	2.38643	-0.07	2.33407	-0.0483	2.20443	-0.0833
841399.5	2.55337	-0.03963	2.48511	-0.0272	2.39172	-0.02031	2.4566	0.0132	2.35715	-0.0212	2.21276	-0.0096
1059259.21	2.52092	0.077678	2.4909	0.07109	2.50928	0.090228	2.37598	0.10027	2.29337	0.06476	2.20577	0.06022
1333528.34	2.58092	0.009434	2.57483	0.06374	2.49611	0.037226	2.37771	0.01268	2.34743	-0.0267	2.31353	0.06186
1678812.72	2.57223	0.032626	2.49348	0.02746	2.50381	0.059535	2.41046	0.04341	2.34615	0.0511	2.2757	0.02338
2113499.99	2.52446	-0.05378	2.5615	0.0061	2.48743	0.008436	2.40776	-0.0274	2.3352	-0.0021	2.22664	-0.0609

BIODIESEL DE CHÍA

	300K		303K		313K		323K		333K		343K	
Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
21.13	2.85055	0.39717	2.81738	0.41232	2.83326	0.52034	2.86985	0.65419	2.77488	0.83669	2.81976	1.03169
26.6	2.75307	0.27158	2.76288	0.27814	2.65394	0.3889	2.57154	0.475	2.56287	0.5857	2.49705	0.70409
33.49	2.6801	0.17611	2.65824	0.25027	2.6618	0.30233	2.60482	0.4248	2.57586	0.5068	2.36111	0.64587
42.16	2.75841	0.20765	2.7639	0.24307	2.69233	0.31249	2.62979	0.36748	2.6274	0.45764	2.54261	0.52176
53.08	2.76662	0.16262	2.74889	0.18765	2.68868	0.23318	2.6309	0.28647	2.61691	0.36803	2.54945	0.41018
66.83	2.77483	0.1176	2.73389	0.13222	2.68502	0.15387	2.63202	0.20545	2.60641	0.27842	2.55629	0.29861
84.13	2.7124	0.10784	2.7116	0.09186	2.58857	0.16154	2.57726	0.21133	2.58218	0.23663	2.50366	0.24521
105.92	2.78993	0.04903	2.71874	0.04868	2.7029	0.08345	2.61562	0.09294	2.56503	0.15377	2.50946	0.17231
133.35	2.78304	0.05941	2.70535	0.04567	2.67714	0.09506	2.64101	0.11304	2.64015	0.168	2.51239	0.15806
167.88	2.75368	0.02275	2.73134	0.04329	2.66797	0.07598	2.62609	0.10443	2.55727	0.08726	2.49743	0.12228
211.35	2.7171	0.02089	2.67117	0.02655	2.62204	0.0378	2.60528	0.07148	2.54494	0.0949	2.46903	0.11914
266.07	2.73838	0.05848	2.73191	0.07686	2.67139	0.02825	2.60495	0.06623	2.50221	0.06905	2.44103	0.05513
334.96	2.75234	0.03494	2.77102	0.04907	2.68409	0.05594	2.55696	0.05397	2.5426	0.03604	2.5244	0.05333
421.69	2.75302	1.43E-02	2.75567	5.20E-02	2.68293	5.74E-02	2.62165	0.02965	2.51712	4.63E-02	2.47921	5.78E-02
530.88	2.7585	-0.0075	2.74473	0.01178	2.68379	0.01614	2.609	-0.0033	2.5697	0.06952	2.50682	0.02092
668.34	2.69392	-0.0056	2.67778	0.02721	2.67288	0.01992	2.56619	-0.003	2.53148	0.03983	2.45623	0.05353
841.39	2.73277	0.00303	2.74191	-0.0151	2.67194	0.01036	2.60352	0.02158	2.5459	0.05565	2.46158	0.04033
1059.25	2.76327	0.01811	2.71068	0.01082	2.64438	0.04684	2.59049	0.06648	2.53078	0.05813	2.47515	0.04031
1333.52	2.76274	0.03191	2.69502	0.05962	2.73149	0.04541	2.62798	0.04218	2.55885	0.04992	2.49153	0.05876
1678.81	2.71817	-0.0174	2.70269	0.02645	2.64519	0.01986	2.60213	-0.001	2.55514	-0.0045	2.50944	0.01522
2113.5	2.74051	0.01775	2.71631	0.01418	2.63432	0.03177	2.58439	-0.0169	2.51371	0.02697	2.47274	0.01772
2660.73	2.69215	0.02209	2.67297	0.01293	2.62177	0.01261	2.53777	0.04804	2.56318	0.00824	2.50543	0.03202
3349.67	2.72402	0.06955	2.69219	0.00305	2.66055	0.04759	2.59552	0.00623	2.52678	-0.0073	2.46386	0.06204
4216.98	2.70462	0.06296	2.67324	0.02688	2.63269	0.03021	2.59004	0.07414	2.55222	0.03842	2.46973	-0.0247
5308.87	2.69783	0.03345	2.71206	0.04024	2.62096	0.01553	2.56895	0.05267	2.54043	0.01812	2.46204	0.07511
6683.47	2.66783	-0.0145	2.65566	-0.0204	2.61703	0.01093	2.55343	0.00414	2.47608	0.02113	2.41959	0.0004
8413.99	2.75679	0.02598	2.71071	0.00078	2.67533	0.04875	2.62002	0.03546	2.57697	0.02225	2.48034	0.02774
10592.59	2.76959	-0.0199	2.65155	-0.0288	2.65942	-0.0112	2.54432	-0.0257	2.47073	0.00526	2.44436	0.05541
13335.28	2.70247	0.00693	2.7167	0.04039	2.64502	0.10155	2.5889	0.06101	2.50163	0.01087	2.39804	0.01347
16788.12	2.68198	-0.0017	2.6711	-0.005	2.62813	0.00081	2.56674	-0.0047	2.50494	0.00975	2.43407	0.02401
21135	2.71273	0.03093	2.72724	0.03366	2.58552	0.04893	2.58187	0.02289	2.50961	0.0184	2.43938	-0.0169
26607.38	2.77307	0.02144	2.6735	0.00291	2.63853	-0.0052	2.56569	-0.0084	2.49102	0.0629	2.46722	0.03563
33496.71	2.65511	0.01946	2.64022	-0.0175	2.62957	0.00928	2.52182	0.02651	2.46745	0.0005	2.414	0.02757
42169.86	2.72989	0.02317	2.64289	0.01485	2.59654	0.0008	2.56363	0.01861	2.53903	0.04969	2.48865	0.02453
53088.71	2.71446	0.03918	2.71415	-2E-05	2.68898	0.01354	2.59314	0.01	2.55569	0.03119	2.41576	-0.0123
66834.73	2.74217	-0.0034	2.73204	0.02424	2.67102	0.04813	2.62916	0.00451	2.57295	0.03537	2.44906	0.00071
84139.95	2.67927	0.02802	2.68285	0.03529	2.64395	0.06242	2.54085	0.05998	2.46603	0.07979	2.41693	0.06765
105925.92	2.68579	0.01858	2.64864	-0.0105	2.57079	0.02968	2.54915	0.05812	2.45747	0.06442	2.41239	0.05865
133352.83	2.7439	-0.0313	2.71876	-0.013	2.63802	0.01525	2.57246	0.0278	2.53091	0.02236	2.45437	0.00909
167881.27	2.69955	0.05115	2.66684	0.048	2.6129	0.0251	2.5156	0.01037	2.47985	-0.0009	2.39694	-0.0094
211349.99	2.67959	-0.0053	2.68689	0.03045	2.65582	0.032	2.54689	0.02747	2.51584	-0.0136	2.46917	-0.013
266073.88	2.72096	0.02342	2.69041	0.0401	2.63845	0.03546	2.55666	0.04232	2.48191	-0.0005	2.42632	0.02231
334967.17	2.69725	0.08932	2.75359	0.0309	2.60975	0.05644	2.58912	0.02522	2.55414	-0.0217	2.45026	0.00669
421698.69	2.73058	0.00028	2.69588	0.03435	2.65253	0.04104	2.53465	0.02122	2.47784	0.02122	2.46534	0.03312
530887.19	2.66367	0.00859	2.66261	-0.0079	2.60153	0.02148	2.51892	0.01014	2.53066	0.00411	2.43427	-0.0179
668347.38	2.67922	-0.0082	2.66712	-0.0023	2.59368	-0.0043	2.55112	-0.0078	2.48358	-0.0096	2.43149	-0.0119
841399.5	2.69865	0.0555	2.66667	-0.0228	2.5533	0.04384	2.64626	0.04875	2.45418	-0.0007	2.356	-0.0029
1059259.21	2.71144	0.02014	2.65677	0.06735	2.57982	0.04065	2.48339	0.02101	2.47142	0.03536	2.42561	0.01091
1333528.34	2.72071	0.02631	2.65764	-0.0045	2.56167	-0.0292	2.46137	0.02202	2.45941	0.01131	2.43593	0.01951
1678812.72	2.6688	0.01781	2.67235	0.04807	2.5656	0.02248	2.51341	0.03149	2.41611	0.02979	2.37596	0.01822
2113499.99	2.67876	0.06024	2.65884	0.01221	2.59356	-0.0434	2.54026	0.00072	2.48175	0.04018	2.47536	0.03342

BIODIESEL DE CANOLA

	300K		303K		313K		323K		333K		343K	
Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
21.13	2.57538	0.11967	2.60744	0.10273	2.61044	0.2045	2.56526	0.26509	2.43201	0.2594	2.42941	0.31414
26.6	2.56807	0.02285	2.52676	0.08793	2.5861	0.13056	2.38212	0.14904	2.50015	0.21013	2.41861	0.25166
33.49	2.56391	0.12112	2.59202	0.11148	2.4546	0.12568	2.39319	0.13704	2.43616	0.21982	2.31142	0.21961
42.16	2.55952	0.03307	2.60455	0.08966	2.5324	0.14889	2.41532	0.08795	2.44121	0.19975	2.36937	0.17893
53.08	2.55861	0.04441	2.58817	0.05156	2.50528	0.09175	2.43172	0.078	2.42408	0.14228	2.36559	0.10658
66.83	2.5577	0.05575	2.57179	0.01346	2.47817	0.03461	2.44811	0.06805	2.40696	0.08481	2.36181	0.03422
84.13	2.58695	0.01081	2.62633	0.0611	2.50084	0.1294	2.57543	0.09008	2.43333	0.09283	2.34844	0.08688
105.92	2.54886	0.05267	2.56105	0.0432	2.48864	0.03813	2.47707	0.07484	2.42451	0.06357	2.36132	0.10422
133.35	2.55387	-0.0226	2.53183	0.02389	2.48037	0.03967	2.50898	0.07748	2.43491	0.02867	2.35366	0.12609
167.88	2.56576	0.03793	2.53659	0.00918	2.53677	0.03229	2.48204	0.06582	2.42381	0.06329	2.37331	0.00704
211.35	2.53568	0.04878	2.53788	0.04857	2.46685	0.05783	2.4602	0.07055	2.3773	0.06784	2.33074	0.06222
266.07	2.59065	-0.0402	2.54988	-0.019	2.56319	-0.0397	2.51378	-0.036	2.40194	0.05296	2.37322	0.07017
334.96	2.642	-0.0296	2.59001	0.00041	2.58781	0.01691	2.45581	0.08706	2.37573	-0.0452	2.33432	-0.0343
421.69	2.60124	3.67E-02	2.57478	4.11E-02	2.48026	4.85E-02	2.51376	-0.0014	2.4084	5.88E-04	2.3729	1.60E-02
530.88	2.61164	-0.0024	2.57342	0.03352	2.49456	0.01522	2.48333	-0.0101	2.37213	0.05117	2.40214	0.00345
668.34	2.69957	0.02439	2.60042	-0.0217	2.46199	0.01182	2.52376	0.02777	2.4533	-0.0116	2.39244	0.03686
841.39	2.58845	-0.0763	2.59462	-0.008	2.54329	-0.0095	2.45672	0.00722	2.4057	-0.0466	2.42357	-0.0251
1059.25	2.54361	0.05103	2.56986	-0.0096	2.52948	0.04995	2.48938	0.0105	2.41785	0.06195	2.35966	0.0263
1333.52	2.57158	0.05971	2.56152	-0.0684	2.56109	0.01449	2.51235	0.01229	2.47228	0.04603	2.3858	0.02924
1678.81	2.5485	-0.0122	2.52069	0.00479	2.50778	0.00121	2.42966	-0.0601	2.40683	-0.0254	2.35964	0.01942
2113.5	2.70849	0.03137	2.61962	-0.0214	2.54387	0.04209	2.48203	0.0124	2.43138	0.07431	2.40671	0.01781
2660.73	2.60789	0.00857	2.60738	0.04319	2.562	0.04194	2.48803	0.0657	2.44266	0.00869	2.35936	0.05482
3349.67	2.53887	0.00676	2.51889	0.0505	2.46677	0.01529	2.42405	-0.0008	2.40164	-0.0032	2.34157	0.04807
4216.98	2.47809	0.00393	2.57162	0.03966	2.46026	0.01602	2.4861	0.01993	2.43224	0.0091	2.3429	-0.0443
5308.87	2.61031	0.00824	2.54609	-0.0019	2.51521	0.0251	2.45462	-0.0006	2.4222	-0.0499	2.38683	0.0613
6683.47	2.59657	0.04866	2.60669	0.02235	2.51707	0.06102	2.49604	0.02293	2.44628	0.0433	2.34714	0.02647
8413.99	2.55217	0.05208	2.52774	0.00261	2.48122	-0.0126	2.41648	0.00715	2.37539	0.01478	2.3773	0.01147
10592.59	2.66868	0.03078	2.53202	0.00896	2.53092	0.12107	2.48217	0.09029	2.43759	0.04382	2.3563	-0.0278
13335.28	2.56345	-0.0695	2.5318	0.05024	2.50777	0.02216	2.4455	0.02229	2.40178	0.04366	2.36148	0.02971
16788.12	2.5634	0.03568	2.57761	0.02075	2.4757	-0.0586	2.36971	-0.0051	2.37322	0.0393	2.3253	0.04304
21135	2.59396	-0.0417	2.60996	-0.0218	2.51911	0.00166	2.48496	-0.0053	2.44779	0.01778	2.28685	0.03408
26607.38	2.53789	0.13178	2.41058	0.02764	2.40523	0.00247	2.35153	0.00446	2.26038	0.01757	2.24483	0.03885
33496.71	2.57916	-0.0036	2.53891	0.00783	2.48668	-0.0033	2.41834	0.08238	2.33992	0.02139	2.28722	-0.0211
42169.86	2.57553	0.10055	2.58578	-0.013	2.47331	0.04552	2.45524	0.01758	2.42049	0.09072	2.37268	0.09562
53088.71	2.54029	0.04957	2.50614	-0.0091	2.39079	-0.0483	2.35061	-0.0138	2.32688	-0.0133	2.26634	0.00662
66834.73	2.58084	0.00958	2.54294	-0.0065	2.49603	0.03053	2.3995	-0.0044	2.36653	-0.0003	2.31153	-0.036
84139.95	2.52329	-0.009	2.54782	0.02377	2.51395	0.02386	2.42989	0.01707	2.31912	0.04859	2.347	0.05657
105925.92	2.5773	-0.0048	2.54361	0.05406	2.43736	-0.017	2.40855	0.03265	2.3967	0.0136	2.28556	0.04742
133352.83	2.57776	0.05353	2.52392	-0.0716	2.50023	0.03257	2.43559	-0.0295	2.3907	0.01926	2.29247	-0.0138
167881.27	2.52799	-0.0145	2.48446	-0.0101	2.44518	0.04296	2.42749	0.00282	2.35865	0.02895	2.26368	0.06332
211349.99	2.5735	-0.0036	2.47672	0.07814	2.42973	0.09149	2.3945	-0.0101	2.33441	0.04367	2.25766	0.04
266073.88	2.47997	0.00688	2.49655	0.01886	2.43192	0.01548	2.39129	0.02057	2.32078	0.06303	2.31357	0.03027
334967.17	2.60679	-0.0021	2.60674	-0.0536	2.5034	0.00919	2.42443	0.00133	2.44394	-0.0235	2.26951	-0.0084
421698.69	2.54845	0.00433	2.55861	0.02665	2.50391	0.00442	2.43728	0.05327	2.41954	0.00632	2.34534	-0.0514
530887.19	2.58247	0.01411	2.52131	-0.0156	2.5018	-0.0501	2.35491	-0.0256	2.36658	-0.0149	2.28634	-0.0185
668347.38	2.47858	0.00463	2.47364	0.08315	2.40909	0.05561	2.39838	0.0349	2.28083	-0.0066	2.25552	0.0473
841399.5	2.49988	0.0151	2.42841	-0.0026	2.46277	-0.0333	2.42041	0.01153	2.35534	-0.0295	2.31141	0.02004
1059259.21	2.51644	-0.018	2.44643	0.00698	2.40382	0.039	2.36735	0.00859	2.32301	-0.0619	2.26076	0.02083
1333528.34	2.48507	0.01248	2.52819	0.06216	2.43021	0.07924	2.43153	0.10385	2.35451	0.10063	2.27396	0.04351
1678812.72	2.53045	0.04823	2.50025	-0.0143	2.47334	0.01142	2.41037	0.04171	2.38969	0.02397	2.29211	-0.0095
2113499.99	2.47692	0.03345	2.50532	0.00759	2.44134	0.06356	2.31766	0.02032	2.37279	0.01126	2.29564	0.02415

BIODIESEL DE MAÍZ

	300K		303K		313K		323K		333K		343K	
Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
21.13	2.57818	0.46781	2.65555	0.5249	2.51772	0.67774	2.48729	0.87679	2.35306	1.10752	2.48311	1.35899
26.6	2.56389	0.31007	2.52762	0.3452	2.5277	0.45826	2.41757	0.58219	2.4368	0.73855	2.36971	0.85323
33.49	2.62446	0.32128	2.54816	0.35568	2.57426	0.46085	2.5113	0.5866	2.40809	0.78733	2.33768	0.90056
42.16	2.55849	0.19135	2.51011	0.26286	2.51093	0.34732	2.45138	0.38901	2.33799	0.54928	2.33452	0.71413
53.08	2.56633	0.18222	2.55349	0.22301	2.52434	0.26279	2.47618	0.32008	2.39366	0.41733	2.38215	0.55144
66.83	2.57417	0.17309	2.59687	0.18316	2.53775	0.17825	2.50099	0.25116	2.44933	0.28539	2.42979	0.38875
84.13	2.66089	0.15112	2.64139	0.14182	2.50942	0.17415	2.50012	0.20716	2.42026	0.28731	2.37836	0.38642
105.92	2.65742	0.10677	2.62372	0.09832	2.55746	0.1546	2.46741	0.17497	2.40878	0.19354	2.35523	0.24984
133.35	2.59685	0.07906	2.57402	0.08543	2.52687	0.10821	2.44341	0.14514	2.40954	0.15046	2.37393	0.23696
167.88	2.63823	0.06984	2.54538	0.10703	2.57257	0.13052	2.48786	0.10703	2.41462	0.14236	2.35888	0.18522
211.35	2.58483	0.04343	2.57397	0.08468	2.48503	0.0743	2.46039	0.0908	2.41042	0.11839	2.32034	0.14611
266.07	2.54119	0.02948	2.53527	0.04416	2.53232	0.03723	2.45754	0.08106	2.39956	0.10177	2.35071	0.06832
334.96	2.65776	0.04827	2.5612	0.02265	2.51026	0.07527	2.45247	0.08554	2.41806	0.15103	2.34349	0.08224
421.69	2.57336	4.65E-02	2.5685	6.56E-02	2.50341	8.93E-02	2.42071	0.06991	2.33604	6.54E-02	2.32135	1.03E-01
530.88	2.58095	0.00451	2.58069	0.01315	2.45302	-0.0002	2.41606	0.02169	2.40173	0.04937	2.31536	0.0863
668.34	2.59156	0.02235	2.57306	0.01631	2.50818	0.00271	2.3874	0.06905	2.37672	0.00657	2.34196	0.00784
841.39	2.61211	-0.0207	2.61612	0.02371	2.52546	0.0202	2.45078	0.03798	2.41262	0.02776	2.37775	0.0591
1059.25	2.61619	0.02282	2.60294	0.01091	2.49107	0.00886	2.43432	0.05131	2.35801	0.04922	2.32631	0.03248
1333.52	2.56934	0.05664	2.54832	0.03818	2.51699	0.04182	2.4653	0.02872	2.34655	0.07989	2.33273	0.04325
1678.81	2.60658	0.02764	2.56397	0.05512	2.52214	0.01598	2.43581	0.00609	2.39391	0.02953	2.33519	0.04651
2113.5	2.59287	0.02477	2.5449	0.02315	2.51031	0.00877	2.4612	0.03859	2.39914	0.03905	2.276	0.03438
2660.73	2.55495	0.03005	2.577	0.03902	2.48593	0.00342	2.46011	0.05773	2.35747	-0.0065	2.31464	0.02152
3349.67	2.55498	0.01758	2.57302	0.01506	2.52315	0.04347	2.43831	0.02331	2.39835	0.02238	2.32126	0.05194
4216.98	2.60136	-0.0217	2.50246	0.02219	2.46893	-0.0538	2.35396	0.01443	2.29425	-0.0332	2.30101	0.01557
5308.87	2.56113	-0.0036	2.52223	-0.0026	2.51132	0.00358	2.37033	0.01686	2.37328	0.01266	2.29503	-0.0151
6683.47	2.55223	-0.0284	2.56078	-0.0019	2.49583	0.02162	2.40288	0.0351	2.36797	-0.0608	2.2926	-0.012
8413.99	2.58933	0.03941	2.55768	0.00525	2.47562	0.03391	2.37072	0.01817	2.34782	0.02946	2.27144	-0.0039
10592.59	2.5018	-0.0009	2.51879	0.08619	2.48303	-0.0074	2.37163	0.01808	2.28135	0.00055	2.31652	0.04981
13335.28	2.59069	-0.0119	2.55495	-0.005	2.56034	-0.0346	2.42695	-0.0143	2.39722	-0.0322	2.35336	0.00785
16788.12	2.60721	0.00127	2.55217	0.0167	2.50431	0.0134	2.41695	-0.0103	2.34751	0.00985	2.29202	0.02584
21135	2.60663	0.00659	2.56074	0.04003	2.51654	0.01076	2.45344	0.05991	2.34615	-0.0427	2.31677	-0.0047
26607.38	2.58359	0.11784	2.53236	0.04921	2.47389	0.01576	2.34822	0.0288	2.43708	0.0505	2.32682	0.04769
33496.71	2.58549	-0.0048	2.56371	0.02299	2.50721	0.00277	2.41295	-0.0016	2.41934	-0.0146	2.34881	0.00773
42169.86	2.5476	-0.0082	2.55303	-0.0044	2.51325	-0.0747	2.37604	-0.0439	2.32297	0.00155	2.27315	-0.0027
53088.71	2.56965	0.03307	2.61567	-0.0192	2.50374	-0.0006	2.45646	-0.0148	2.31026	-0.0295	2.33434	-0.0467
66834.73	2.57166	0.00818	2.59554	0.01729	2.52685	-0.023	2.4877	0.01043	2.39321	0.03301	2.37579	-0.0213
84139.95	2.63808	-0.0229	2.58801	-0.0264	2.51568	-0.0102	2.43961	-0.0154	2.37649	-0.025	2.2715	0.01626
105925.92	2.53371	0.01039	2.50974	-8E-06	2.49089	0.00419	2.40293	0.05792	2.34653	0.02189	2.32779	0.00278
133352.83	2.64355	-0.0071	2.54555	-0.0539	2.48783	-0.024	2.34837	-0.0567	2.42225	-0.0167	2.28391	-0.0831
167881.27	2.61145	0.00906	2.54192	0.00795	2.50788	0.01659	2.4007	-0.0347	2.34058	0.01854	2.23276	0.01842
211349.99	2.60577	-0.0211	2.56802	0.01736	2.49968	0.01296	2.45102	0.03447	2.38952	-0.0467	2.3348	-0.0366
266073.88	2.61318	-0.0021	2.55888	0.00465	2.47374	0.00174	2.4194	-0.0483	2.38605	0.02187	2.30883	-0.004
334967.17	2.51233	-0.0296	2.50664	-0.0407	2.41837	-0.0094	2.37772	-0.0638	2.36537	-0.0479	2.25853	-0.076
421698.69	2.55058	-0.0168	2.60825	-0.0079	2.52489	-0.0076	2.39936	-0.0275	2.34909	-0.0287	2.33804	-0.0057
530887.19	2.57546	0.00455	2.58857	0.00632	2.51272	-0.0267	2.44634	0.00397	2.366	0.01248	2.32574	-0.0326
668347.38	2.59388	0.02195	2.56511	0.00074	2.5082	0.02706	2.45404	0.00866	2.40941	-0.0374	2.31166	-0.0047
841399.5	2.54379	-0.0077	2.60472	0.00231	2.4745	0.00257	2.37958	0.01386	2.29483	0.03502	2.30515	0.01262
1059259.21	2.54281	0.05272	2.49718	0.02262	2.41724	0.02901	2.35293	-0.0283	2.3116	0.01947	2.21449	0.00988
1333528.34	2.57472	-0.0137	2.4539	0.04108	2.44398	-0.0202	2.39385	-0.0419	2.33866	-0.0692	2.17151	-0.0549
1678812.72	2.45663	0.0167	2.45951	0.00768	2.45145	-0.0387	2.33817	-0.0508	2.23694	-0.0832	2.18217	-0.1014
2113499.99	2.51833	0.01459	2.44637	-0.0069	2.43842	-0.0713	2.32689	-0.0566	2.246	-0.0936	2.23318	-0.1319

BIODIESEL SOJA

	300K		303K		313K		323K		333K		343K	
Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
21.13	2.53859	0.304419	2.55135	0.294107	2.46528	0.4042	2.42281	0.4362	2.39015	0.63932	2.36005	0.72364
26.6	2.52998	0.179447	2.55024	0.235572	2.45108	0.30845	2.45613	0.34226	2.38436	0.42698	2.37773	0.51319
33.49	2.53019	0.154763	2.54625	0.192598	2.4743	0.23879	2.42324	0.33021	2.39107	0.35736	2.33987	0.44652
42.16	2.5304	0.13008	2.54227	0.149625	2.43801	0.22403	2.45436	0.21863	2.39778	0.28775	2.32835	0.3632
53.08	2.56188	0.11537	2.54175	0.133708	2.47859	0.16426	2.43993	0.19058	2.40022	0.24914	2.35372	0.27909
66.83	2.59335	0.10066	2.54124	0.117792	2.51918	0.10448	2.4255	0.16253	2.40267	0.21054	2.37908	0.19498
84.13	2.53814	0.081458	2.52236	0.177193	2.46109	0.13481	2.40644	0.14583	2.33872	0.16998	2.32937	0.16646
105.92	2.5554	0.046023	2.53625	0.06032	2.47917	0.04392	2.47262	0.0858	2.42167	0.1003	2.37139	0.16537
133.35	2.65456	0.075563	2.52931	0.035506	2.53593	0.06296	2.43718	0.0709	2.41751	0.09846	2.39352	0.13913
167.88	2.50344	0.07567	2.52019	0.043963	2.44169	0.07168	2.39887	0.09538	2.36506	0.06743	2.29327	0.08321
211.35	2.54189	0.016217	2.52999	-0.00558	2.5039	0.05016	2.43951	0.06172	2.4316	0.07399	2.34624	0.06058
266.07	2.56143	0.046031	2.54955	0.077342	2.46533	0.03232	2.4558	0.06465	2.36349	0.04602	2.3766	0.07707
334.96	2.56143	0.023031	2.50245	0.023946	2.49146	0.07564	2.46451	0.05528	2.39359	0.08629	2.34955	0.03399
421.69	2.54144	-2.85E-02	2.53501	-7.13E-03	2.49111	1.45E-02	2.46574	-0.01	2.41059	2.97E-02	2.33662	4.58E-02
530.88	2.55112	0.024371	2.52687	0.063171	2.4791	0.0202	2.44231	0.04143	2.37323	0.03475	2.37789	0.02464
668.34	2.56696	0.00854	2.59183	0.019091	2.54183	0.01513	2.46929	0.02239	2.41887	0.0093	2.31639	0.08256
841.39	2.54718	0.001146	2.54495	0.004327	2.53304	0.01925	2.44427	0.00899	2.41512	0.01062	2.37459	0.01408
1059.25	2.54959	0.018763	2.57349	0.040687	2.48984	0.01359	2.4593	0.03537	2.39112	0.02573	2.37028	0.06955
1333.52	2.55156	0.054216	2.58704	0.056058	2.5468	0.05695	2.51367	0.05082	2.41552	0.11201	2.36928	0.06612
1678.81	2.52552	-0.00527	2.52675	0.00578	2.49051	0.03727	2.48051	0.01546	2.37045	0.02014	2.33785	0.03268
2113.5	2.57922	0.028503	2.61235	0.004994	2.53682	0.01623	2.46539	0.01269	2.47186	0.01909	2.41369	0.04428
2660.73	2.534	0.007426	2.52908	-0.03329	2.46474	0.03186	2.4305	0.00722	2.38184	0.04839	2.34109	0.04725
3349.67	2.5578	0.009334	2.55968	-0.00326	2.48914	0.00922	2.44619	0.03939	2.40266	0.01328	2.31679	0.01668
4216.98	2.54893	0.054489	2.54519	0.056487	2.52499	0.03117	2.44426	0.07849	2.36507	0.04572	2.33071	0.07158
5308.87	2.54318	0.032507	2.56694	0.070818	2.48504	0.03824	2.43033	0.01624	2.38434	0.04514	2.35122	0.02811
6683.47	2.58541	-0.01555	2.55078	0.006184	2.51245	0.01282	2.45127	-0.0308	2.43508	-0.0053	2.41712	0.01379
8413.99	2.56331	0.04191	2.53433	0.014516	2.50056	0.04033	2.43371	0.0278	2.44568	0.00974	2.34115	0.00509
10592.59	2.48746	0.03335	2.54324	0.004343	2.43739	0.05404	2.41387	0.05578	2.29289	0.03838	2.27771	0.03332
13335.28	2.556	0.01817	2.52032	-0.02589	2.45591	-0.0034	2.4121	-0.0025	2.38399	0.02546	2.34733	0.00245
16788.12	2.52811	0.001343	2.5256	-0.00077	2.46977	-0.0047	2.41612	0.03158	2.39602	0.04255	2.31546	-0.0122
21135	2.53099	0.014775	2.53143	0.028416	2.43288	0.00927	2.41732	-0.0112	2.35803	-0.0078	2.28612	0.03014
26607.38	2.56239	0.00482	2.47079	0.048032	2.4423	0.02129	2.39396	0.01139	2.3773	0.01009	2.33178	0.04004
33496.71	2.50518	0.001086	2.52676	-0.02665	2.5189	-0.0387	2.42256	-0.0038	2.39719	0.03293	2.32466	0.03539
42169.86	2.5166	0.040511	2.47659	0.078443	2.45622	-0.0127	2.3725	0.03667	2.34479	0.0174	2.25952	-0.0233
53088.71	2.54696	-0.00071	2.55339	-0.02471	2.47276	-0.0078	2.4001	-0.0172	2.39009	-0.0291	2.30458	-0.0573
66834.73	2.53899	0.043555	2.53413	0.01538	2.4605	-0.0116	2.38372	0.00379	2.36389	0.02307	2.27769	0.04755
84139.95	2.55388	-0.05357	2.51645	-0.04444	2.51661	-0.0226	2.45083	-0.0298	2.43112	-0.0272	2.36661	-0.0321
105925.92	2.52973	-0.01621	2.48326	0.037441	2.46728	0.00827	2.40898	-0.0046	2.29358	0.02476	2.25954	0.02342
133352.83	2.59301	0.05928	2.52185	0.0831	2.46585	0.00322	2.37297	0.07883	2.38065	0.04031	2.30938	0.09369
167881.27	2.51023	0.009432	2.48126	0.015598	2.4061	-0.028	2.34758	-0.0047	2.36582	-0.0264	2.27362	0.00449
211349.99	2.55553	-0.00039	2.53677	-0.03586	2.48502	-0.0227	2.38512	-0.0349	2.33045	0.0184	2.32189	-0.0114
266073.88	2.54322	-0.04244	2.53536	-0.01728	2.45413	0.01594	2.42206	-0.0156	2.38226	-0.0005	2.40482	-0.0111
334967.17	2.53878	0.002625	2.5622	0.083602	2.49844	-0.0077	2.48046	-0.0118	2.42056	-0.0407	2.32162	-0.0162
421698.69	2.52847	0.049751	2.48766	0.006937	2.50693	0.00756	2.39339	0.03631	2.35651	0.04445	2.28177	0.0289
530887.19	2.52183	0.014424	2.49421	0.008936	2.4439	-0.0188	2.41737	0.00206	2.37252	0.02613	2.28185	-0.0118
668347.38	2.49351	0.061869	2.50772	0.032784	2.41262	0.00731	2.40358	0.02259	2.3247	-0.0047	2.30571	-0.0024
841399.5	2.48504	-0.00369	2.49018	0.04629	2.47905	-0.0032	2.41032	-0.0072	2.3369	0.01478	2.23464	-0.0114
1059259.21	2.55272	0.031015	2.58059	0.004915	2.52059	-0.0161	2.45597	0.01593	2.3751	-0.029	2.34522	0.00077
1333528.34	2.51755	0.024249	2.5059	0.008614	2.40603	0.01572	2.44885	-0.0331	2.37921	-0.0142	2.29358	-0.0066
1678812.72	2.54619	0.003847	2.49821	0.034337	2.47045	0.02764	2.45413	0.0183	2.31963	0.02495	2.29113	0.02191
2113499.99	2.56951	0.053924	2.52404	0.018179	2.51059	-0.0175	2.42366	0.01563	2.36837	0.01188	2.30993	0.01531

BIODIESEL DE UVA

	300K		303K		313K		323K		333K		343K	
Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
21.13	2.69153	1.38584	2.5812	1.34912	2.42307	1.87472	2.51462	2.41681	2.50517	3.00099	2.3038	3.85489
26.6	2.81529	0.8886	2.74931	0.89168	2.6778	1.20394	2.61068	1.7038	2.63666	2.11673	2.6169	2.59018
33.49	2.85543	0.86313	2.86142	0.8942	2.73055	1.24259	2.65124	1.65833	2.67762	2.07753	2.57233	2.6044
42.16	2.74607	0.72366	2.74579	0.7716	2.66103	0.9931	2.62099	1.30254	2.5576	1.56871	2.45167	2.00232
53.08	2.71797	0.58053	2.66337	0.61709	2.61616	0.80026	2.57918	1.0482	2.48202	0.08089	2.47859	1.5993
66.83	2.68986	0.4374	2.58096	0.46258	2.57129	0.60741	2.53738	0.79387	2.56139	0.97463	2.50551	1.19627
84.13	2.63297	0.46271	2.78973	0.34949	2.62269	0.42771	2.57944	0.69465	2.55437	0.73521	2.50939	0.96294
105.92	2.66517	0.2838	2.61784	0.28669	2.53899	0.35964	2.51134	0.46474	2.41955	0.58826	2.32396	0.72148
133.35	2.63767	0.10507	2.68013	0.15038	2.54444	0.26339	2.58653	0.34869	2.50534	0.46828	2.41376	0.58545
167.88	2.68338	0.24229	2.60089	0.18038	2.53812	0.31012	2.4464	0.38374	2.43545	0.375	2.3156	0.56613
211.35	2.6388	0.12857	2.64351	0.16928	2.58471	0.21676	2.52096	0.30568	2.4494	0.28485	2.38399	0.41249
266.07	2.6383	0.25935	2.56528	0.14592	2.58465	0.18924	2.47263	0.33775	2.47309	0.28488	2.38944	0.34362
334.96	2.58569	0.15018	2.59764	0.08619	2.5547	0.09153	2.44805	0.14373	2.46467	0.20107	2.39276	0.21664
421.69	2.61782	4.44E-02	2.66939	6.72E-02	2.60732	3.55E-02	2.50673	0.07157	2.40903	1.70E-01	2.40341	1.60E-01
530.88	2.65134	0.03283	2.60476	0.0668	2.56117	0.08012	2.4966	0.09389	2.44196	0.10362	2.41002	0.13793
668.34	2.70363	0.05921	2.66231	0.04138	2.6286	0.04554	2.51813	0.05778	2.47697	0.05631	2.4028	0.08638
841.39	2.67806	0.03533	2.68896	0.0124	2.52868	0.01537	2.54913	0.07373	2.52207	0.05816	2.45841	0.02817
1059.25	2.63271	0.01148	2.69748	0.02982	2.60288	0.07553	2.51855	0.05981	2.48887	0.07996	2.38821	0.06295
1333.52	2.65373	0.08679	2.635	-0.0251	2.52123	0.0498	2.5544	-0.0029	2.46361	0.06658	2.35302	-0.0037
1678.81	2.5314	-0.0427	2.70302	0.07199	2.53735	0.01931	2.52179	0.1047	2.36884	0.06381	2.37254	0.03357
2113.5	2.60236	0.08272	2.54953	-0.0103	2.45042	0.00429	2.39847	0.09774	2.37795	0.0216	2.40182	0.03865
2660.73	2.64688	0.01946	2.6099	-0.0176	2.52476	-0.0278	2.48697	-0.0287	2.41461	-0.0304	2.37832	0.07179
3349.67	2.66186	0.05382	2.65529	0.0502	2.58183	0.10149	2.58564	0.08313	2.49067	0.03503	2.39046	0.10279
4216.98	2.65082	0.02044	2.65503	-0.0406	2.64449	-0.0062	2.54037	0.01856	2.45867	0.02229	2.38672	-0.038
5308.87	2.58256	0.03936	2.67674	0.03645	2.57597	0.02565	2.43447	0.04111	2.43703	-0.0207	2.40081	0.03215
6683.47	2.60829	0.01665	2.53425	0.04531	2.54522	-0.0004	2.45348	0.0351	2.39542	0.01257	2.36984	-0.011
8413.99	2.61567	0.11709	2.59555	0.09882	2.5761	0.11673	2.46172	0.04717	2.50963	0.04249	2.40497	0.11611
10592.59	2.61381	0.07165	2.593	-0.1272	2.62775	0.04013	2.5182	-0.0094	2.40249	-0.018	2.38214	0.05365
13335.28	2.7008	0.034	2.51744	0.03493	2.49095	-0.0268	2.55107	-0.0143	2.50215	0.05841	2.38727	0.03293
16788.12	2.74458	0.04395	2.77427	0.0855	2.5948	0.0646	2.52428	0.06429	2.53818	0.06632	2.44818	0.05254
21135	2.63585	0.0652	2.63906	-0.0024	2.55178	-0.0359	2.5288	-0.0111	2.39723	-0.0061	2.3619	0.0421
26607.38	2.69947	0.04898	2.6887	0.12904	2.53634	0.09578	2.56668	0.00393	2.39148	0.00734	2.35088	0.05809
33496.71	2.61731	-0.0164	2.56871	-0.0053	2.5553	-0.0131	2.50837	0.0199	2.37385	0.02448	2.38231	0.03265
42169.86	2.60458	0.10338	2.67647	0.0263	2.5745	0.00857	2.51653	0.03308	2.44859	-0.0468	2.40131	0.0444
53088.71	2.61615	0.01293	2.59464	0.0607	2.51659	0.00879	2.46793	0.05245	2.4329	0.02066	2.36442	-0.0458
66834.73	2.6048	-0.0133	2.59085	-0.0003	2.48258	-0.0092	2.50342	0.02434	2.37909	0.04882	2.33005	0.02884
84139.95	2.67175	0.07361	2.58367	-0.0312	2.57638	-0.0241	2.46681	-0.025	2.46585	0.00409	2.41974	-0.0158
105925.92	2.59068	-0.0474	2.58671	0.06758	2.49366	0.00519	2.4979	0.04584	2.39025	0.01419	2.32507	-0.0123
133352.83	2.68519	0.04114	2.56006	0.00098	2.42429	-0.0225	2.36678	0.08366	2.30228	-0.0089	2.36186	0.02791
167881.27	2.61474	-0.0027	2.54829	0.02668	2.49807	-0.071	2.50528	-0.0301	2.37544	0.0152	2.31835	0.05692
211349.99	2.65589	-0.033	2.56686	0.00559	2.52291	-0.0993	2.45155	-0.0641	2.31915	-0.0035	2.26119	-0.0707
266073.88	2.55604	-0.0534	2.53794	0.0271	2.48287	-0.0229	2.40978	-0.0261	2.36637	-0.0286	2.29075	-0.0261
334967.17	2.57574	0.01696	2.55299	-0.0228	2.49555	0.09655	2.51549	-0.0741	2.4422	-0.0474	2.26981	0.06724
421698.69	2.66349	0.00924	2.54372	-0.0241	2.46028	0.00871	2.50964	0.05144	2.37065	0.04602	2.357	0.00174
530887.19	2.60687	0.08574	2.60081	0.03433	2.50776	0.08114	2.47496	0.03706	2.39082	0.06368	2.30906	0.09512
668347.38	2.59587	-0.049	2.57145	-0.0145	2.48442	-0.0544	2.50129	-0.0102	2.41995	-0.0136	2.38407	-0.0479
841399.5	2.51586	0.03972	2.64385	0.04262	2.49187	0.1866	2.48671	0.01586	2.34106	-0.0108	2.24609	-0.021
1059259.21	2.64874	0.01772	2.58854	0.0128	2.56523	-0.0272	2.42913	0.02976	2.40525	-0.0112	2.35317	0.01838
1333528.34	2.56157	-0.0035	2.54907	-0.0009	2.49753	0.1208	2.48012	-0.03	2.36247	0.01587	2.33049	0.0025
1678812.72	2.57469	0.04331	2.59995	0.00634	2.55208	0.0137	2.4437	0.06756	2.43567	0.05077	2.36525	0.03582
2113499.99	2.59299	-0.0192	2.58923	0.06193	2.50319	0.01717	2.36034	0.09146	2.33386	-0.1059	2.25461	0.04143

ACEITE DE GIRASOL

	300K		303K		313K		323K		333K		343K	
Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
21.13	2.57642	0.050488	2.49966	0.052748	2.46937	0.053415	2.52652	0.16169	2.4638	0.182656	2.38557	0.27375
26.6	2.52522	0.032249	2.40159	0.073728	2.45791	0.082704	2.40026	0.11337	2.33836	0.181262	2.39573	0.21586
33.49	2.50162	0.051721	2.52003	0.045695	2.46719	0.073413	2.41451	0.15997	2.39756	0.221302	2.38628	0.22279
42.16	2.49308	0.038494	2.49751	0.027862	2.44488	0.02631	2.40157	0.07159	2.34077	0.092718	2.30403	0.1705
53.08	2.49045	0.034017	2.48164	-0.00872	2.47018	0.009561	2.39185	0.04214	2.33532	0.066044	2.30203	0.12397
66.83	2.48783	0.02954	2.46578	-0.0453	2.49547	-0.00719	2.38212	0.01269	2.32987	0.039371	2.30003	0.07745
84.13	2.5042	-0.0446	2.50794	-0.03474	2.44568	0.029649	2.4134	0.02923	2.35467	0.028188	2.31281	0.05671
105.92	2.46046	0.037978	2.48109	0.062742	2.44218	0.04948	2.37947	0.07758	2.32206	0.049478	2.315	0.07326
133.35	2.53252	0.023343	2.51685	-0.0009	2.44919	0.019649	2.36416	6.7E-05	2.35197	0.02678	2.33066	0.01537
167.88	2.50888	-0.00187	2.51564	0.001146	2.47036	0.055578	2.35111	0.064	2.33282	0.051954	2.30716	0.09681
211.35	2.51844	-0.02689	2.4793	0.013608	2.43495	0.032077	2.41823	0.01118	2.34153	0.024784	2.29258	0.05631
266.07	2.5182	0.068542	2.42764	0.018326	2.39512	-0.03082	2.36513	0.05032	2.38999	0.020257	2.29514	0.01472
334.96	2.49292	0.009639	2.45697	-0.01725	2.40299	-0.03542	2.43062	-0.0073	2.34876	0.057265	2.33008	0.00422
421.69	2.40976	-1.36E-02	2.46267	-4.29E-02	2.41057	-1.60E-02	2.35653	5.35E-03	2.33935	-1.94E-02	2.26471	5.21E-03
530.88	2.52351	-0.00497	2.47732	-0.00553	2.432	-0.00831	2.36189	-0.0071	2.33018	0.032608	2.30929	0.01577
668.34	2.51275	0.026473	2.48262	0.009583	2.48495	0.022963	2.3977	0.00126	2.29799	0.015768	2.31827	-0.0029
841.39	2.52013	0.044034	2.51435	0.032603	2.45671	0.015222	2.36232	-0.0224	2.31668	-0.01362	2.30196	0.02093
1059.25	2.46769	0.013954	2.48998	0.020727	2.44342	-0.00408	2.38258	0.06594	2.31767	0.029274	2.31165	0.06221
1333.52	2.46209	0.012453	2.46549	-0.01997	2.39188	0.013893	2.37687	-0.0242	2.34117	-0.03639	2.27863	0.04818
1678.81	2.5177	0.071915	2.45749	0.014266	2.42932	0.024592	2.40062	0.03165	2.38759	0.007719	2.32399	0.00898
2113.5	2.46676	-0.00202	2.4482	0.046869	2.42813	0.006695	2.40662	0.04094	2.34614	0.024538	2.27753	0.00011
2660.73	2.50317	0.031022	2.49643	0.019951	2.44111	0.019693	2.39323	0.04694	2.36344	0.067538	2.28756	0.01492
3349.67	2.47634	0.022149	2.49483	0.044701	2.44827	0.004125	2.37075	0.02192	2.36033	0.025241	2.34032	0.03349
4216.98	2.44957	-0.02046	2.43167	-0.03726	2.35187	-0.00104	2.33439	0.02589	2.33502	0.034067	2.24388	-0.0129
5308.87	2.47507	0.008566	2.46848	0.012078	2.41851	0.042683	2.35676	-0.0076	2.37453	-5.8E-05	2.25196	0.03589
6683.47	2.51182	0.020764	2.47442	0.014707	2.42041	-0.00652	2.36795	0.0175	2.26591	0.057213	2.27985	-0.0094
8413.99	2.44354	0.031501	2.45728	0.014388	2.41505	0.017421	2.34851	0.01663	2.33894	0.031428	2.27888	0.0279
10592.59	2.4598	0.042143	2.48672	-0.00694	2.48701	0.108456	2.37396	0.02758	2.32229	0.039351	2.29486	0.03729
13335.28	2.4591	0.062543	2.47654	0.022041	2.39421	0.045338	2.39283	0.01658	2.33465	0.02638	2.24032	0.00257
16788.12	2.47657	0.047023	2.43629	-0.00364	2.41077	0.010184	2.32419	-0.0057	2.28732	0.015703	2.28862	0.03888
21135	2.48345	-0.02612	2.44636	0.035375	2.38273	0.01993	2.35267	-0.0258	2.32674	0.013238	2.26581	0.02732
26607.38	2.43253	0.068411	2.40775	-0.00263	2.36331	-0.01064	2.28536	0.05162	2.3579	0.016382	2.20905	0.0717
33496.71	2.43104	0.019636	2.43785	-0.02527	2.40397	0.027909	2.35537	0.0118	2.32049	0.043784	2.28815	0.02294
42169.86	2.47813	-0.01255	2.43261	0.044987	2.40643	-0.05347	2.39148	0.00774	2.29864	0.03775	2.24702	-0.0084
53088.71	2.39255	-0.0088	2.45956	-0.04874	2.37022	0.027097	2.36008	-0.0095	2.29308	-0.01236	2.30751	-0.0132
66834.73	2.49275	-0.00265	2.44601	0.019185	2.39839	0.039958	2.32721	0.01308	2.30477	7.26E-05	2.22964	0.02326
84139.95	2.49472	0.020868	2.42719	0.050712	2.41086	0.049133	2.44031	0.0343	2.31605	0.040295	2.25591	0.06849
105925.92	2.46499	-9E-05	2.44622	0.000394	2.34751	-0.01682	2.32394	0.00447	2.33427	0.001997	2.24561	0.00904
133352.83	2.4943	-0.01287	2.40138	0.00772	2.41537	0.013918	2.33853	0.01585	2.34428	0.056906	2.26215	0.04571
167881.27	2.46895	0.048429	2.4415	0.023198	2.42987	0.050135	2.33884	-0.0072	2.29271	0.021754	2.22941	-0.0112
211349.99	2.47281	0.057922	2.48904	0.038053	2.41989	0.067726	2.40508	0.04794	2.33005	-0.0217	2.268	-0.0008
266073.88	2.46212	0.029689	2.4195	0.04954	2.42294	0.009639	2.29746	0.00269	2.31897	0.036754	2.25968	0.02812
334967.17	2.47861	0.038402	2.48522	0.048426	2.41902	0.017264	2.35051	0.03314	2.281	0.127851	2.24569	0.03464
421698.69	2.45639	0.022618	2.44141	-0.01192	2.38251	0.016631	2.27697	0.02808	2.2978	-0.01982	2.22465	0.01558
530887.19	2.44381	0.026268	2.37088	0.024685	2.31856	0.017668	2.2802	0.03255	2.25341	0.052481	2.20815	-0.0121
668347.38	2.45286	0.03876	2.44987	0.02563	2.41027	0.050482	2.32816	-0.0012	2.28764	0.039027	2.28129	0.00511
841399.5	2.55412	0.014565	2.43678	0.04464	2.38544	0.021557	2.31678	0.03924	2.31024	0.018519	2.30392	0.0075
1059259.21	2.43502	0.066701	2.36735	0.009763	2.28902	0.034243	2.31027	0.02278	2.22498	-0.00835	2.22555	0.02765
1333528.34	2.42342	0.013606	2.36844	-0.01134	2.31301	-0.04823	2.25032	-0.0318	2.26528	0.00055	2.24019	-0.0554
1678812.72	2.43409	0.067442	2.35484	0.000606	2.26028	-0.04549	2.28453	-0.0639	2.25117	-0.02525	2.23465	0.03654
2113499.99	2.547	0.059779	2.34005	-0.03048	2.23721	-0.06353	2.20646	-0.0147	2.20491	-0.02123	2.27813	0.05533

ACEITE DE OLIVA

	300K		303K		313K		323K		333K		343K	
Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
21.13	2.46492	0.06118	2.44249	-0.0145	2.39643	0.02818	2.39857	0.05654	2.36725	0.0661	2.32214	0.12464
26.6	2.46782	-0.0263	2.43864	-0.0276	2.45855	-0.0041	2.35445	0.04575	2.3173	0.00304	2.27536	0.09205
33.49	2.38313	0.04618	2.43098	0.04117	2.34567	0.0486	2.30035	0.08479	2.33152	0.10166	2.34554	0.13794
42.16	2.44694	0.03672	2.44623	0.02243	2.39936	-0.0023	2.36738	0.02109	2.30608	0.04125	2.28067	0.06022
53.08	2.44649	0.03324	2.4309	0.02128	2.38852	0.04443	2.37046	0.0174	2.31556	0.05174	2.26983	0.05179
66.83	2.44605	0.02977	2.41556	0.02012	2.37767	0.0911	2.37354	0.0137	2.32504	0.06222	2.25899	0.04335
84.13	2.43163	0.0045	2.43723	-0.0262	2.42301	0.0152	2.4122	-0.0034	2.35205	-0.0445	2.29636	0.012
105.92	2.41846	0.01286	2.38181	-0.0436	2.3612	-0.0187	2.35506	0.02184	2.32973	0.0108	2.248	0.0422
133.35	2.42235	0.00723	2.44658	0.06504	2.35556	0.02596	2.37492	0.01146	2.32076	-0.0248	2.24431	0.03613
167.88	2.41322	0.00899	2.4247	-0.008	2.37852	0.01001	2.36695	-0.0051	2.33857	0.02641	2.27588	-0.0109
211.35	2.42937	0.01948	2.42531	0.01846	2.3923	0.01335	2.36337	0.02867	2.31279	0.06031	2.26369	0.04378
266.07	2.46258	-0.0007	2.38512	-0.0018	2.34869	-0.0255	2.31929	-0.0396	2.27527	-0.0067	2.23443	0.03887
334.96	2.50931	0.0272	2.42687	0.06192	2.41785	0.01522	2.3881	0.02576	2.36579	0.04937	2.29153	0.05983
421.69	2.46235	5.63E-02	2.38165	1.41E-02	2.39361	4.25E-02	2.37171	8.62E-03	2.32234	2.56E-02	2.27663	3.90E-02
530.88	2.445	0.04371	2.45915	0.04671	2.3905	0.00773	2.36107	0.04642	2.28764	0.02585	2.2877	0.07286
668.34	2.48343	0.0269	2.4288	0.03594	2.42578	-0.0189	2.36007	0.03592	2.29402	0.04882	2.24941	0.01555
841.39	2.44057	-0.0012	2.42824	0.01353	2.35336	-0.0353	2.34471	0.01198	2.28278	-0.0031	2.25375	-0.0227
1059.25	2.4963	0.01237	2.45119	0.02393	2.39761	0.0319	2.39219	0.02136	2.32267	0.00981	2.28115	0.01931
1333.52	2.44626	-0.015	2.44247	0.00718	2.4017	-0.0471	2.3516	0.00937	2.27795	-0.0237	2.24338	-0.0644
1678.81	2.42894	0.01203	2.41593	8.3E-05	2.36218	-0.0047	2.37876	0.04309	2.30409	0.00873	2.27332	0.00218
2113.5	2.41638	-0.0445	2.46319	0.02791	2.36555	0.04422	2.33663	-0.0197	2.28497	0.07099	2.2612	0.02546
2660.73	2.40346	-0.0057	2.42676	0.02672	2.38119	0.02889	2.32584	0.06787	2.27513	-0.0001	2.28956	0.01776
3349.67	2.43451	-0.0143	2.41675	0.0166	2.39725	0.00613	2.3434	-0.0026	2.2637	-0.0114	2.24176	0.00285
4216.98	2.4414	-0.0361	2.45328	-0.0316	2.37796	0.03533	2.2955	0.02804	2.2969	0.05821	2.27939	-0.0037
5308.87	2.43534	0.01831	2.41103	0.0481	2.36933	0.02369	2.28545	0.02644	2.33247	0.04435	2.23882	0.01683
6683.47	2.39248	0.00846	2.3645	-0.0198	2.33579	0.02189	2.35128	0.05412	2.30568	0.0143	2.25869	-0.019
8413.99	2.46468	0.00411	2.32382	0.01456	2.38327	0.00384	2.35507	0.02081	2.28464	0.03036	2.26858	0.01327
10592.59	2.44453	0.00958	2.41051	0.0005	2.35796	-0.0212	2.32838	0.03705	2.25202	0.01758	2.21883	-0.0099
13335.28	2.46762	-0.0047	2.40723	0.03692	2.36328	-0.0442	2.30872	0.03332	2.28156	0.07117	2.23907	0.02889
16788.12	2.36829	0.02554	2.38651	0.0175	2.29896	0.03578	2.34129	0.02898	2.27219	0.04724	2.28626	0.02649
21135	2.44255	0.00983	2.40784	0.01773	2.42241	0.03452	2.33855	0.03038	2.24721	0.05206	2.26952	0.03354
26607.38	2.44433	-0.0047	2.38244	-0.0348	2.42314	-0.0403	2.35333	-0.0268	2.35473	0.01081	2.22407	0.01015
33496.71	2.41453	0.0252	2.43912	-0.0088	2.35608	-0.039	2.32412	0.00096	2.2916	-0.0068	2.15645	-0.0122
42169.86	2.3969	-0.043	2.37117	-0.019	2.36904	-0.0248	2.31264	0.01042	2.2823	0.04048	2.25515	0.01762
53088.71	2.36638	0.06481	2.40886	0.0281	2.36485	0.02271	2.30163	0.05208	2.28134	0.01347	2.19759	0.03308
66834.73	2.41517	0.04338	2.38004	0.00933	2.36246	0.03364	2.3222	0.03545	2.26902	0.02151	2.23636	0.02201
84139.95	2.41239	0.00695	2.38598	-0.0124	2.29708	-0.0261	2.30575	-0.015	2.31921	-0.0084	2.22282	0.02986
105925.92	2.41439	0.00827	2.37208	0.03584	2.36116	0.02599	2.32987	0.02568	2.23553	0.03068	2.19919	-0.0084
133352.83	2.47522	-0.0296	2.50974	0.04987	2.42463	0.06066	2.38107	-0.0093	2.35679	-0.02	2.19797	0.01712
167881.27	2.4275	-0.005	2.41084	0.01431	2.38763	0.0174	2.31575	0.00495	2.23501	0.00553	2.23763	0.01153
211349.99	2.40808	0.01579	2.44207	0.03962	2.33416	-0.0338	2.29605	0.00702	2.29294	0.0048	2.25141	-0.0143
266073.88	2.4913	-0.001	2.44773	-0.0156	2.36372	-0.0141	2.29221	0.01335	2.2502	-0.0144	2.26741	0.00427
334967.17	2.43315	0.07219	2.40027	0.06764	2.34768	0.03365	2.30055	0.04892	2.21121	0.01113	2.20289	0.03017
421698.69	2.46105	-0.0039	2.4487	0.00498	2.37648	-0.0009	2.36086	-0.0045	2.24108	-0.0549	2.24726	-0.0044
530887.19	2.34579	-0.0056	2.4124	-0.0196	2.33756	-0.0006	2.28481	-0.0267	2.2608	-0.0237	2.2806	-0.018
668347.38	2.4228	0.00647	2.44188	0.03797	2.38426	0.00503	2.36642	-0.0026	2.2913	-0.0227	2.29149	-0.0005
841399.5	2.45391	0.04028	2.41185	0.06319	2.40894	0.03253	2.2817	0.01782	2.24822	-0.0092	2.2205	0.05591
1059259.21	2.37593	0.01205	2.35437	0.01367	2.30563	0.00666	2.30053	0.02501	2.26197	-0.0088	2.15739	0.03026
1333528.34	2.4208	-0.0056	2.38422	-0.0129	2.32254	-0.0004	2.33416	-0.0159	2.30512	0.03001	2.1718	-0.0133
1678812.72	2.39137	0.03319	2.37442	0.00032	2.34569	-0.0026	2.29668	-0.013	2.29801	0.01793	2.21088	-0.0267
2113499.99	2.38284	-0.0276	2.33512	-0.0317	2.37037	-0.0317	2.28542	-0.0684	2.33078	0.03269	2.21019	-0.0346

ACEITE DE CHÍA

	300K		303K		313K		323K		333K		343K	
Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
21.13	2.58135	0.24239	2.57448	0.30129	2.49237	0.48895	2.39362	0.67507	2.44852	0.96739	2.39165	1.36867
26.6	2.60631	0.1774	2.59235	0.23883	2.59672	0.34897	2.47464	0.4641	2.44644	0.67643	2.42995	0.91446
33.49	2.58566	0.22453	2.56026	0.211	2.52126	0.30327	2.50059	0.49516	2.46393	0.66736	2.40747	0.95337
42.16	2.588	0.06104	2.5185	0.15328	2.52095	0.30635	2.442	0.41349	2.44265	0.51494	2.37124	0.75587
53.08	2.61676	0.07651	2.55029	0.14697	2.52851	0.24747	2.48105	0.30854	2.44603	0.42614	2.39461	0.59103
66.83	2.64551	0.09198	2.58209	0.14065	2.53607	0.18859	2.52009	0.20359	2.4494	0.33735	2.41797	0.42619
84.13	2.57396	0.0594	2.54234	0.09341	2.51057	0.11337	2.3897	0.21318	2.48042	0.25766	2.35663	0.36747
105.92	2.58329	0.06603	2.55417	0.029	2.61347	0.10153	2.46607	0.09437	2.47215	0.17903	2.38566	0.24139
133.35	2.59577	0.09502	2.60584	0.08479	2.55378	0.09781	2.49202	0.11856	2.44	0.15889	2.43897	0.22754
167.88	2.64567	0.03062	2.60633	0.01695	2.53709	0.10161	2.4656	0.13615	2.48009	0.14269	2.37419	0.19547
211.35	2.56604	0.0366	2.58418	0.0185	2.54681	0.07083	2.52531	0.05225	2.43527	0.07919	2.42674	0.13166
266.07	2.57051	0.05062	2.57487	0.0319	2.53345	0.02144	2.46169	0.04692	2.4609	0.07832	2.43383	0.09197
334.96	2.53743	0.02557	2.5588	-0.0106	2.492	0.06874	2.4343	0.01126	2.44955	0.0169	2.38202	0.07642
421.69	2.63068	4.08E-02	2.60809	3.06E-02	2.51572	6.11E-02	2.46067	6.46E-02	2.43467	8.33E-02	2.39402	1.07E-01
530.88	2.57682	-0.0171	2.5229	-0.004	2.49231	-0.0038	2.41756	0.00353	2.43265	0.03995	2.35049	0.02547
668.34	2.58611	0.01158	2.5638	0.0215	2.53471	0.07276	2.49578	0.00884	2.46765	0.02045	2.39583	0.06545
841.39	2.56739	0.01097	2.5229	0.0427	2.53199	-0.0112	2.49379	0.02023	2.44559	0.03026	2.3923	0.0472
1059.25	2.64185	0.02082	2.61172	0.03949	2.52263	0.01836	2.44721	0.08095	2.41678	0.02593	2.35459	0.05586
1333.52	2.58653	0.04522	2.53522	0.04739	2.49966	0.04638	2.44471	0.02768	2.40565	0.02938	2.37747	0.08939
1678.81	2.55263	0.00756	2.57038	-0.0233	2.51269	0.02324	2.4733	0.03518	2.47213	0.02162	2.37456	0.01621
2113.5	2.57558	0.0515	2.59868	0.00951	2.59459	-0.006	2.46349	0.06009	2.44591	0.07522	2.44976	0.06562
2660.73	2.61339	0.03247	2.57685	0.02109	2.53211	0.05749	2.51055	0.04686	2.46577	0.0307	2.39901	0.03112
3349.67	2.55937	-0.0093	2.53899	-0.0281	2.50609	0.02065	2.47026	-0.0052	2.4195	0.03597	2.39505	-0.0142
4216.98	2.61136	0.0151	2.57601	-0.0391	2.53982	-0.0136	2.47473	-0.0163	2.44808	-0.0195	2.38177	-0.001
5308.87	2.59617	0.04272	2.5431	-0.0028	2.51352	0.01579	2.4809	0.05187	2.41074	0.05689	2.30584	-0.006
6683.47	2.50993	-0.0183	2.58827	0.00356	2.51192	0.03008	2.45845	0.01862	2.3899	-0.0084	2.37936	-0.0006
8413.99	2.58054	0.00977	2.58488	0.0424	2.52048	0.03751	2.43553	-0.0117	2.45868	0.06613	2.32902	0.03489
10592.59	2.54878	-0.0453	2.51995	0.05134	2.45031	0.02083	2.40367	0.00985	2.3508	-0.0034	2.31491	-0.0092
13335.28	2.50031	0.04856	2.52107	0.04707	2.47284	0.02117	2.48639	0.06094	2.42046	0.00172	2.35717	0.0273
16788.12	2.55403	0.03321	2.52463	0.02173	2.46582	-0.0015	2.45156	0.08126	2.38165	0.04122	2.35247	0.03934
21135	2.59155	0.05731	2.52885	0.02912	2.5164	0.05613	2.44508	0.00524	2.41268	0.02481	2.38171	0.02555
26607.38	2.56165	0.04161	2.56986	0.06813	2.42573	0.02948	2.40314	0.06229	2.37014	0.13021	2.33731	0.08109
33496.71	2.57867	0.02159	2.53965	-0.0489	2.47549	-0.0497	2.48755	0.02187	2.39287	0.00094	2.34434	-0.0245
42169.86	2.5601	0.04376	2.56647	-0.0121	2.45473	-0.0203	2.46821	0.04847	2.36602	0.00413	2.34861	-0.0582
53088.71	2.56147	-0.0407	2.56044	0.01641	2.50413	0.00585	2.42921	0.01333	2.39908	0.03684	2.35394	-0.0034
66834.73	2.58222	0.0038	2.54952	0.00398	2.5061	0.03041	2.45979	0.05249	2.42136	-0.0002	2.36446	0.02946
84139.95	2.55872	0.02489	2.55391	0.00034	2.47703	-0.0138	2.39354	0.00724	2.39813	0.01558	2.302	-0.0468
105925.92	2.56085	0.03417	2.51332	-0.0074	2.43686	-0.0553	2.399	0.01674	2.38036	0.00486	2.3325	-0.0375
133352.83	2.53792	-0.0629	2.56666	-0.027	2.52367	0.0197	2.47147	-0.0447	2.38291	-0.0283	2.35635	-0.0251
167881.27	2.57512	0.00601	2.56238	-0.0006	2.49885	-0.0079	2.4476	-0.0348	2.41535	0.01235	2.3501	0.00051
211349.99	2.55411	-0.0266	2.55685	0.01884	2.47575	0.05935	2.44098	-0.0412	2.43685	-0.0085	2.36742	0.05679
266073.88	2.54923	0.03388	2.51724	0.01404	2.46134	-0.0107	2.38409	-0.0549	2.3573	-0.0178	2.33707	-0.0002
334967.17	2.51801	0.05419	2.54113	0.03663	2.46861	0.07093	2.46821	0.04885	2.36257	-0.0006	2.27787	0.03638
421698.69	2.57894	0.01141	2.56544	0.02158	2.47636	0.03355	2.43517	0.01525	2.38068	-0.0297	2.33025	0.02657
530887.19	2.59327	-0.0098	2.54617	0.01242	2.50492	0.01036	2.43108	-0.0032	2.39218	-0.031	2.31646	-0.0122
668347.38	2.52093	0.01647	2.54746	0.01852	2.47659	0.00408	2.40724	0.0046	2.34859	0.01492	2.32265	-0.0283
841399.5	2.52068	0.02939	2.52452	0.00955	2.48958	0.01662	2.42385	0.01819	2.33058	-0.0009	2.34871	0.01663
1059259.21	2.56512	0.03538	2.54928	0.04056	2.51142	-0.0197	2.45331	0.02824	2.34952	-0.0046	2.33567	0.05111
1333528.34	2.54261	-0.0275	2.54018	0.02639	2.46366	-0.007	2.40645	0.01552	2.38725	0.02421	2.27622	0.00793
1678812.72	2.58273	0.00365	2.53783	0.03542	2.49691	0.00868	2.41341	-0.0009	2.40804	-0.0026	2.33632	0.0282
2113499.99	2.60387	0.08044	2.55459	0.03352	2.45011	-0.0015	2.42214	0.01205	2.39125	0.00145	2.29162	0.01683

ACEITE DE CANOLA

	300K		303K		313K		323K		333K		343K	
Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
21.13	2.38881	0.01955	2.43219	0.04253	2.36126	0.02668	2.39006	0.06293	2.2991	0.102596	2.26689	0.093887
26.6	2.42822	-0.0189	2.37464	0.04587	2.33695	0.04496	2.34727	0.015553	2.20481	0.036443	2.2401	0.037421
33.49	2.41146	0.01424	2.3562	0.01345	2.38963	-0.0163	2.2877	0.019401	2.24631	0.036776	2.26102	0.032976
42.16	2.39655	-0.0071	2.34939	-0.0097	2.35202	-0.0308	2.34428	0.012517	2.32375	0.001876	2.23597	0.032088
53.08	2.4171	0.00133	2.39166	-0.0042	2.34016	0.00074	2.3336	0.010284	2.32924	-0.00603	2.26242	0.02696
66.83	2.43764	0.00977	2.43393	0.00122	2.32829	0.03228	2.32293	0.008052	2.33472	-0.01395	2.28887	0.021832
84.13	2.39678	0.06896	2.38115	-0.0116	2.33613	-0.0257	2.30051	-0.04488	2.22965	0.005187	2.30268	-0.01553
105.92	2.45128	0.00145	2.37955	0.02253	2.39514	0.05959	2.35637	0.008668	2.27959	0.03881	2.23041	0.049821
133.35	2.44685	0.01451	2.41453	-0.0083	2.31169	0.00393	2.34493	0.030891	2.27971	0.016723	2.19668	0.003723
167.88	2.45522	0.00754	2.41486	0.04363	2.36423	-0.0104	2.32843	0.018442	2.28179	0.012561	2.24536	0.028842
211.35	2.44307	-0.0011	2.39735	0.01377	2.38025	-0.0026	2.33874	0.033286	2.32721	-0.00017	2.28248	0.044716
266.07	2.43701	0.01451	2.39427	0.03185	2.36305	0.01823	2.30727	0.041366	2.26205	0.021953	2.26672	0.026669
334.96	2.39043	-0.0269	2.35787	0.0131	2.34387	0.0474	2.4151	-0.02834	2.22204	-0.02278	2.189	0.06497
421.69	2.41787	8.99E-03	2.41821	2.27E-02	2.35552	1.23E-02	2.33681	-1.16E-02	2.31236	-2.88E-02	2.23411	-6.38E-03
530.88	2.366	0.01856	2.32363	-0.0178	2.36474	0.03024	2.3692	-0.00392	2.24611	-0.01637	2.24971	-0.01325
668.34	2.39098	-0.0253	2.4123	0.00377	2.36467	0.04493	2.28676	-0.02994	2.26763	0.015559	2.21176	0.035319
841.39	2.41911	0.04091	2.40587	0.03368	2.34158	0.00992	2.33561	0.062603	2.29287	0.048444	2.23985	0.054406
1059.25	2.39599	0.01332	2.37456	0.02018	2.36798	0.03559	2.33793	0.012877	2.2889	0.033231	2.24012	0.025294
1333.52	2.34866	0.0424	2.37497	0.04412	2.3387	0.03036	2.29058	0.040232	2.24116	0.018589	2.16793	0.080669
1678.81	2.3862	-0.0015	2.35431	0.01189	2.33324	-0.0083	2.30314	-0.02669	2.21588	0.014596	2.19828	0.00173
2113.5	2.37618	0.00165	2.35226	0.0557	2.34752	-0.0173	2.28812	0.021254	2.26046	0.029945	2.22475	-0.01601
2660.73	2.34755	0.00767	2.39292	-0.0513	2.30731	0.0276	2.26187	0.00122	2.24624	0.021647	2.19065	-7.3E-05
3349.67	2.34431	0.01278	2.36334	0.02034	2.32651	0.03454	2.31068	0.015018	2.2541	0.023123	2.21504	0.015838
4216.98	2.33751	-0.0054	2.35684	-0.0055	2.2936	0.01647	2.27678	-0.00562	2.18234	-0.01782	2.21809	0.022377
5308.87	2.38913	0.01408	2.36611	-0.009	2.38668	0.01751	2.28079	0.033756	2.24729	0.040681	2.24681	-0.00944
6683.47	2.36367	0.03333	2.34709	-0.0079	2.28013	0.01677	2.26862	-0.03233	2.20658	0.050468	2.18089	-0.01821
8413.99	2.32246	0.01347	2.34464	-5E-06	2.38947	0.0333	2.26678	0.007385	2.26466	-0.00721	2.1746	-0.0017
10592.59	2.40062	-0.0851	2.49096	-0.0848	2.33656	-0.0337	2.29755	0.009303	2.25251	-0.04514	2.18016	-0.01994
13335.28	2.3558	-0.061	2.34706	0.00788	2.32082	0.00272	2.30101	0.011521	2.22483	0.016634	2.21088	0.017059
16788.12	2.38326	-0.0052	2.3624	0.00086	2.33628	-0.031	2.28226	-0.01147	2.21468	-0.01565	2.18791	0.013523
21135	2.3678	-0.035	2.39411	-0.0074	2.29928	0.01981	2.25439	0.027522	2.24894	0.021604	2.17795	0.002996
26607.38	2.36267	-0.0546	2.38199	-0.0531	2.33547	-0.0306	2.35772	0.050969	2.27292	0.007147	2.19776	-0.04948
33496.71	2.38688	0.02752	2.37747	-0.0005	2.29757	0.03645	2.23357	-0.01417	2.22814	-0.00899	2.21778	0.046647
42169.86	2.38398	0.04303	2.38285	0.02744	2.2489	0.00657	2.32803	0.027953	2.18189	-0.0014	2.18306	0.001283
53088.71	2.3684	0.02777	2.36423	-0.0281	2.30694	-0.01	2.24212	-0.00143	2.21743	0.005088	2.21315	0.022434
66834.73	2.39896	0.00389	2.3659	-0.0202	2.33379	-0.0102	2.35901	-0.02131	2.25308	0.030935	2.22369	-0.00424
84139.95	2.33739	-0.0668	2.36032	-0.0094	2.36973	0.00771	2.31306	-0.03696	2.21729	-0.05407	2.17781	0.022054
105925.92	2.35251	0.01816	2.37103	0.00409	2.32028	-0.0052	2.24663	0.02299	2.23535	0.009334	2.19332	-0.03216
133352.83	2.40225	0.08535	2.43593	0.04962	2.35109	0.03908	2.32009	-0.03166	2.35288	0.032622	2.22414	-0.018
167881.27	2.38396	-0.0572	2.38394	-0.0425	2.3146	-0.0257	2.28025	-0.01512	2.20418	-0.04294	2.1665	-0.01857
211349.99	2.34858	0.05974	2.38978	0.04723	2.33635	0.04877	2.26081	0.052565	2.24717	-0.0055	2.21085	0.028086
266073.88	2.4033	0.03948	2.39437	0.04668	2.36053	0.03487	2.30982	-5.3E-05	2.2189	0.027488	2.1612	0.033728
334967.17	2.43101	-0.003	2.38661	0.00809	2.34867	0.00087	2.26631	-0.01084	2.23468	-2.5E-06	2.22567	0.028756
421698.69	2.36671	0.0882	2.36191	0.02335	2.32564	0.04013	2.20211	0.003514	2.20678	0.031448	2.1442	0.025142
530887.19	2.31103	0.06965	2.31289	0.05655	2.32159	0.00122	2.23775	0.060333	2.1921	0.049726	2.15741	0.046804
668347.38	2.3315	0.0877	2.28981	0.05805	2.28085	0.03406	2.24208	0.021781	2.20638	0.019639	2.18473	0.026458
841399.5	2.34921	-0.0019	2.30461	0.00177	2.29334	0.00527	2.31465	0.029518	2.23457	0.046966	2.20169	-0.02475
1059259.21	2.34136	0.02091	2.31986	0.04969	2.29034	0.0476	2.23749	0.016183	2.19261	-0.00956	2.17085	0.019111
1333528.34	2.28463	0.02243	2.25769	0.04402	2.23584	0.03614	2.22046	0.047246	2.17515	0.069289	2.16851	0.050986
1678812.72	2.35398	0.04569	2.33081	0.05042	2.31095	0.00219	2.25666	0.024942	2.23058	0.045894	2.18011	-0.00087
2113499.99	2.32844	0.0198	2.33094	0.04718	2.3317	0.03253	2.25294	0.039355	2.22976	-0.00875	2.18811	0.066088

ACEITE DE MAÍZ

	300K		303K		313K		323K		333K		343K	
Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
21.13	2.54094	0.023249	2.43896	0.045035	2.40278	0.03979	2.26179	0.04306	2.58909	0.10104	2.35448	0.151601
26.6	2.4922	0.03781	2.45779	0.033588	2.44411	0.04318	2.35318	0.03051	2.40845	0.08245	2.28744	0.070794
33.49	2.47644	0.008657	2.47882	0.019378	2.41466	0.03749	2.3788	0.05449	2.37907	0.06059	2.37899	0.122829
42.16	2.49922	0.009415	2.46641	-0.02931	2.43263	0.02377	2.40962	-0.0036	2.35176	0.05464	2.29932	0.08247
53.08	2.48545	0.008461	2.47374	-0.0117	2.41073	0.00434	2.42318	-0.0025	2.33562	0.02497	2.30954	0.051886
66.83	2.47168	0.007508	2.48108	0.005903	2.38883	-0.0151	2.43674	-0.0014	2.31949	-0.0047	2.31976	0.021302
84.13	2.48076	-0.0066	2.47986	0.017934	2.42252	0.02718	2.37171	0.01178	2.32037	0.02054	2.25396	0.069795
105.92	2.48332	0.055346	2.42984	0.043468	2.39687	0.03817	2.42768	0.12511	2.33311	0.03617	2.29813	0.05464
133.35	2.51948	-0.02457	2.46519	-0.00569	2.42829	0.00483	2.35763	0.03654	2.33353	0.04847	2.27948	0.066177
167.88	2.51037	-0.02089	2.47978	0.039821	2.45703	0.04252	2.41952	0.02475	2.34173	0.02103	2.28657	0.047829
211.35	2.49739	-0.0073	2.4891	-0.02983	2.39441	0.02077	2.40731	-0.0065	2.32063	-0.0103	2.30828	0.032253
266.07	2.49898	0.029302	2.46308	-0.03159	2.40524	0.00305	2.37433	-0.0282	2.31289	-0.0411	2.26852	-0.02155
334.96	2.52661	0.004223	2.47972	0.019699	2.46678	0.01515	2.40463	-0.0008	2.3779	0.00474	2.31766	0.040842
421.69	2.46301	-3.31E-04	2.50324	-1.47E-02	2.43232	5.26E-03	2.38353	9.41E-03	2.3368	1.65E-02	2.27991	-2.88E-02
530.88	2.47838	-0.02493	2.48431	0.027841	2.4173	-0.0197	2.34015	0.03123	2.33814	0.00231	2.27444	0.01334
668.34	2.45281	0.023551	2.44779	0.002906	2.41366	0.03904	2.34896	-0.0103	2.33668	0.04684	2.26341	0.002291
841.39	2.46829	0.010755	2.45184	-0.04827	2.42101	0.01881	2.36297	0.03654	2.30373	0.02447	2.2809	-0.0291
1059.25	2.46618	-0.01121	2.48308	-0.03848	2.40423	0.00756	2.39189	0.03562	2.30082	0.01715	2.25991	-0.02077
1333.52	2.46734	-0.06885	2.47959	-0.00557	2.45066	-0.0231	2.38641	0.01161	2.35879	0.01244	2.32077	-0.02088
1678.81	2.43612	0.026053	2.4477	0.030261	2.39952	0.04056	2.35036	0.04746	2.24723	0.02397	2.24961	0.058446
2113.5	2.47015	0.030477	2.43481	0.027574	2.3925	0.03059	2.35503	-0.0051	2.32977	0.06514	2.28589	0.035438
2660.73	2.43362	-0.02556	2.52667	0.006691	2.42176	-0.0358	2.41636	-0.03	2.33866	-0.0218	2.23299	-0.01824
3349.67	2.45692	-0.04117	2.42371	-0.00203	2.38554	0.02177	2.3437	0.02571	2.31514	0.00838	2.25407	-0.00798
4216.98	2.46504	-0.04287	2.41871	-0.03632	2.36467	0.00166	2.32834	0.00903	2.30655	0.03222	2.25695	0.010028
5308.87	2.45014	0.018881	2.44507	0.053328	2.44632	-0.0236	2.36777	0.01455	2.27761	-0.0378	2.25633	0.006675
6683.47	2.468	0.059705	2.46849	0.031569	2.36922	-0.0106	2.3978	0.02354	2.37302	0.03398	2.39934	0.013803
8413.99	2.45075	0.043774	2.48193	0.07854	2.42675	0.04934	2.32068	0.00745	2.29793	0.04943	2.27953	-0.00946
10592.59	2.39866	-0.0386	2.45575	0.02057	2.37889	0.03923	2.35268	0.03924	2.27517	0.01186	2.23504	0.032267
13335.28	2.49224	0.01678	2.48717	0.063713	2.38424	0.03657	2.36899	0.03362	2.31978	0.0379	2.25745	0.027361
16788.12	2.4474	-0.01117	2.44677	0.073118	2.39441	0.03147	2.35537	-0.0175	2.31697	0.02297	2.22614	0.030489
21135	2.46489	0.024024	2.44506	0.029509	2.4187	0.02217	2.33358	0.04707	2.2851	0.03272	2.23622	0.034355
26607.38	2.42702	0.04046	2.45144	0.012573	2.42668	0.02832	2.43022	0.01778	2.31421	0.05891	2.23594	0.021124
33496.71	2.44342	0.008457	2.38836	0.069367	2.34973	0.00285	2.36537	0.03506	2.29868	0.04193	2.23615	0.044492
42169.86	2.49266	0.038882	2.48344	-0.02033	2.38125	0.04834	2.39717	-0.0055	2.30565	0.0203	2.29078	-0.00619
53088.71	2.43346	-0.02357	2.44038	-0.00772	2.38141	0.00879	2.34394	0.02913	2.30281	0.02955	2.22853	-0.00905
66834.73	2.49926	-0.02186	2.41804	0.010788	2.40392	-0.0104	2.365	0.01293	2.2849	0.00486	2.21099	0.03552
84139.95	2.50125	0.007348	2.45164	0.010324	2.40551	-0.0182	2.35652	-0.0082	2.27725	0.04067	2.22017	0.028473
105925.92	2.46418	0.001377	2.43648	0.013994	2.42123	0.04382	2.35405	0.04517	2.2903	0.02219	2.23876	-0.02311
133352.83	2.46329	0.091789	2.46366	0.023172	2.44712	0.02211	2.39733	0.04795	2.33767	0.057	2.26112	-0.03406
167881.27	2.45034	0.031995	2.50604	0.027366	2.43383	0.0186	2.36129	0.00769	2.30987	0.00716	2.28795	0.034738
211349.99	2.47903	0.020216	2.43652	-0.02284	2.36204	0.01295	2.34451	0.00458	2.31417	0.00575	2.25191	0.043705
266073.88	2.48349	0.036389	2.44209	0.044818	2.37809	-0.0003	2.326	0.0062	2.29636	0.01197	2.28885	0.009313
334967.17	2.53887	-0.01769	2.42174	0.005077	2.41036	0.01101	2.34368	0.01416	2.28848	0.04995	2.26303	0.005354
421698.69	2.43929	0.007753	2.43915	0.026521	2.36544	0.01886	2.31208	0.02264	2.28598	0.04386	2.24931	0.011013
530887.19	2.44632	-0.06716	2.37336	0.006284	2.35876	-0.0008	2.32625	-0.0076	2.25502	0.00356	2.25147	-0.01232
668347.38	2.41764	0.015192	2.41486	-0.03187	2.35	-0.0047	2.30645	0.01502	2.28468	-0.0245	2.2746	-0.0065
841399.5	2.43671	0.026328	2.43528	0.029729	2.32997	0.01296	2.35466	0.04827	2.29667	-0.066	2.24186	0.031541
1059259.21	2.43893	0.026714	2.44266	0.006067	2.35456	0.01955	2.32613	0.02084	2.28362	0.0171	2.20204	-0.00631
1333528.34	2.43916	0.043936	2.4182	-0.01125	2.43514	0.00135	2.33142	-0.0149	2.30148	0.048	2.25804	-0.01062
1678812.72	2.38242	0.021217	2.37022	0.038238	2.37901	0.02611	2.2884	0.01818	2.1937	0.03249	2.20649	0.015263
2113499.99	2.43496	-0.01523	2.42561	-0.00511	2.3759	0.01081	2.29935	-0.0024	2.22895	-0.0123	2.17641	-0.00571

ACEITE DE SOJA

	300K		303K		313K		323K		333K		343K	
Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
21.13	2.52367	0.006756	2.51892	0.0685	2.48472	0.13863	2.43517	0.191482	2.40939	0.30622	2.43193	0.38705
26.6	2.44053	0.043679	2.47181	0.05978	2.3889	0.08646	2.38685	0.08232	2.3184	0.18749	2.35845	0.29609
33.49	2.3948	0.049027	2.36655	0.03169	2.37468	0.05529	2.34663	0.106753	2.30223	0.20312	2.22632	0.29676
42.16	2.45568	0.024906	2.43483	0.03267	2.38374	0.04856	2.34547	0.079594	2.30162	0.15835	2.30187	0.21293
53.08	2.45368	0.005246	2.4561	0.03371	2.39266	0.0543	2.36814	0.066452	2.33743	0.10425	2.32535	0.17556
66.83	2.45167	-0.01441	2.47737	0.03475	2.40157	0.06005	2.39082	0.053309	2.37324	0.05015	2.34882	0.13819
84.13	2.44326	0.020443	2.43331	-0.0186	2.42251	0.05428	2.32577	0.080994	2.33109	0.02079	2.25305	0.08204
105.92	2.50971	0.036247	2.39983	-0.0138	2.37769	0.05733	2.31775	0.085963	2.352	0.03626	2.28754	0.05863
133.35	2.43926	0.038931	2.42496	0.03417	2.39632	0.07216	2.3452	0.036205	2.28863	0.07898	2.24179	0.06437
167.88	2.47006	0.017001	2.45631	0.06621	2.39324	0.01205	2.34379	0.053707	2.31259	0.06133	2.32277	0.06901
211.35	2.48257	0.031847	2.45306	0.04769	2.43481	0.0029	2.33028	0.044519	2.32535	0.07603	2.2841	0.06897
266.07	2.46433	0.008282	2.41304	-0.0182	2.40038	-0.0547	2.38417	0.019449	2.30637	0.00622	2.26785	0.04279
334.96	2.49121	-0.02247	2.45039	0.07279	2.38663	0.06561	2.42215	0.065799	2.34018	0.06721	2.23106	0.10631
421.69	2.49886	-1.71E-03	2.47415	3.15E-04	2.38332	1.92E-02	2.34946	-2.85E-02	2.32459	1.95E-02	2.25724	3.95E-02
530.88	2.48005	0.037724	2.43761	0.02988	2.37869	0.03231	2.36621	0.006493	2.32881	0.0828	2.26483	0.02168
668.34	2.47383	-0.02182	2.46305	-0.0119	2.43225	0.00265	2.34156	-0.028	2.26913	-0.0181	2.25741	-0.0426
841.39	2.42334	0.028668	2.45931	-0.0076	2.40814	0.01893	2.36178	0.001439	2.28817	0.0163	2.29143	-0.0113
1059.25	2.48548	-0.02271	2.44313	0.0397	2.38827	0.01503	2.3538	0.009584	2.29371	0.00651	2.27859	0.03033
1333.52	2.45152	-0.01856	2.41706	0.01127	2.41935	-0.0092	2.35916	0.022912	2.32221	-0.0075	2.28288	-0.0117
1678.81	2.47056	-0.0167	2.46603	-0.0175	2.43811	0.03416	2.3662	0.013732	2.34407	0.00392	2.32862	-0.0025
2113.5	2.42155	0.034659	2.45163	0.04522	2.35698	0.04261	2.36055	0.064854	2.31875	0.00626	2.26827	0.00563
2660.73	2.49224	-0.01874	2.44741	0.01349	2.45466	-0.0203	2.39019	-0.0102	2.32272	0.01592	2.31008	0.01085
3349.67	2.47979	0.034648	2.46314	0.00824	2.42788	0.01067	2.38276	-2.9E-05	2.33944	0.00954	2.26993	0.00299
4216.98	2.50631	0.01046	2.42791	0.0615	2.43204	0.0321	2.35109	0.034008	2.34911	0.02108	2.28264	0.0294
5308.87	2.45353	0.044587	2.43558	0.02698	2.41658	0.0307	2.37914	-0.00236	2.32678	0.04523	2.23821	0.02928
6683.47	2.46038	-0.00696	2.38718	0.01558	2.39369	-0.0209	2.33603	-0.0017	2.24296	-0.0016	2.23615	0.02184
8413.99	2.47323	0.033971	2.46395	0.00581	2.42045	0.00954	2.39708	0.001297	2.32385	0.02096	2.26796	0.01578
10592.59	2.42788	0.059192	2.4216	0.03224	2.42137	0.03076	2.36513	0.017923	2.32844	0.06929	2.30274	-0.0074
13335.28	2.50188	0.055106	2.48027	-0.0061	2.43396	0.03859	2.42705	0.027271	2.34083	0.04627	2.29073	0.08281
16788.12	2.46133	0.032091	2.42524	0.02931	2.3641	0.0395	2.33415	0.061499	2.2543	0.06188	2.23829	0.04417
21135	2.46054	0.043043	2.42558	0.02475	2.37564	0.00027	2.33902	0.033604	2.29817	0.05505	2.28829	0.06197
26607.38	2.41372	-0.01804	2.42652	0.0391	2.37202	0.00225	2.30007	0.007889	2.27344	0.06314	2.22404	0.04523
33496.71	2.48533	-0.00509	2.39967	-0.0108	2.3737	0.00747	2.35804	0.018651	2.28683	0.01637	2.21727	0.04936
42169.86	2.40469	0.05782	2.41833	0.0229	2.39648	0.01245	2.33995	0.01442	2.2455	0.03058	2.33596	0.03455
53088.71	2.42674	0.000322	2.40448	-0.0019	2.33106	0.02828	2.29639	0.023284	2.23228	0.00713	2.20333	0.00535
66834.73	2.44309	0.005996	2.40066	0.01007	2.37253	0.01718	2.3106	-0.02729	2.28249	0.01348	2.23147	-0.0121
84139.95	2.43529	0.056372	2.425	0.01476	2.39379	0.02565	2.32462	0.034943	2.31979	-0.0053	2.21357	0.0707
105925.92	2.38951	-0.00656	2.4097	0.02438	2.36645	0.01662	2.33255	0.029975	2.28656	-0.0008	2.20276	0.05312
133352.83	2.40667	0.033503	2.40177	0.05143	2.39025	0.00924	2.32169	0.026116	2.24426	-0.0065	2.2227	0.09247
167881.27	2.43687	0.040973	2.4045	0.03267	2.36503	0.01903	2.32411	0.01176	2.29679	-0.0015	2.25326	0.00037
211349.99	2.48552	0.01548	2.37966	0.04019	2.36538	0.04781	2.3208	0.031828	2.24236	0.00475	2.16504	0.00367
266073.88	2.41765	0.008354	2.39926	0.00393	2.37441	0.0193	2.34512	0.012127	2.25657	0.02828	2.22425	-0.0133
334967.17	2.37811	0.020568	2.38992	0.04279	2.33057	-0.0048	2.27412	0.014333	2.28434	0.07296	2.21263	0.01326
421698.69	2.39205	0.027912	2.36657	0.00325	2.32646	0.03904	2.23704	-0.00466	2.27246	0.02427	2.17259	0.05647
530887.19	2.40659	0.027618	2.43258	-0.0145	2.33768	0.01066	2.27635	0.017375	2.26332	-0.0287	2.19943	-0.0138
668347.38	2.36153	-0.0469	2.41553	-0.0149	2.35896	-0.0324	2.29353	-0.04647	2.28631	-0.0428	2.18028	0.00464
841399.5	2.43834	0.000651	2.40168	-0.0005	2.37232	-0.022	2.32234	-0.0319	2.24265	0.02405	2.21199	0.05869
1059259.21	2.463	-0.05505	2.43284	-0.0173	2.37056	-0.0388	2.37526	-0.04222	2.27816	-0.0232	2.25297	-0.013
1333528.34	2.42344	0.00146	2.41683	-0.0044	2.32571	0.0313	2.31203	0.040874	2.30091	0.03025	2.23479	0.01873
1678812.72	2.40263	0.016484	2.36574	0.00742	2.34589	-0.0157	2.28429	0.001174	2.24267	-0.0152	2.20675	0.02364
2113499.99	2.42105	0.102706	2.40542	0.02571	2.36428	0.02618	2.31579	-0.0075	2.2817	0.01777	2.20837	0.06135

ACEITE DE UVA

	300K		303K		313K		323K		333K		343K	
Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
21.13	2.52442	0.08569	2.43256	0.08266	2.39983	0.13209	2.41397	0.24764	2.31411	0.34648	2.28435	0.46006
26.6	2.48543	0.05625	2.47236	0.10677	2.42809	0.04365	2.38401	0.12744	2.37756	0.20422	2.36892	0.3594
33.49	2.45104	0.03252	2.44679	0.04732	2.47037	0.08361	2.4225	0.13187	2.29801	0.17228	2.33395	0.29709
42.16	2.50223	0.03422	2.51816	0.00338	2.48625	0.07347	2.32997	0.09376	2.36389	0.18098	2.27417	0.23035
53.08	2.51267	0.02984	2.51221	0.00989	2.47651	0.04818	2.35791	0.06653	2.38035	0.16761	2.30419	0.2031
66.83	2.5231	0.02547	2.50626	0.01641	2.46677	0.02289	2.38584	0.03931	2.39682	0.15424	2.33421	0.17584
84.13	2.44232	0.04949	2.51343	-0.0136	2.48947	0.01498	2.45386	0.06141	2.3609	0.03951	2.34586	0.13812
105.92	2.51929	0.04713	2.4975	0.06007	2.4218	0.03879	2.38097	0.07196	2.34505	0.09924	2.30517	0.14931
133.35	2.51561	-0.0209	2.4999	0.03828	2.48992	0.02435	2.43962	0.0417	2.33831	0.048	2.3197	0.1152
167.88	2.48289	0.00844	2.4794	0.04365	2.42163	0.04464	2.37534	0.06325	2.38525	0.06488	2.32652	0.05535
211.35	2.48746	-0.0347	2.47441	-0.0058	2.4288	0.02106	2.41097	-0.0194	2.35863	0.02884	2.28411	0.0421
266.07	2.49586	0.07261	2.49733	0.077	2.46799	0.07498	2.38211	0.06575	2.37519	0.05317	2.31861	0.11308
334.96	2.50476	0.03331	2.53239	-0.0046	2.43845	0.02825	2.38932	0.02544	2.28912	0.04426	2.34024	0.04068
421.69	2.50393	6.82E-03	2.44179	4.96E-02	2.45839	4.60E-03	2.34385	4.03E-02	2.36487	4.93E-02	2.28972	2.19E-02
530.88	2.47506	-0.0096	2.47423	0.03897	2.44231	0.01801	2.38865	0.04045	2.31678	0.0556	2.27827	0.06572
668.34	2.50626	0.02038	2.46338	0.00871	2.43644	0.02447	2.39068	0.03452	2.3216	0.0179	2.32277	0.03011
841.39	2.49381	0.01378	2.46433	-0.0173	2.46058	0.01604	2.3691	-0.0011	2.33849	-0.0068	2.28639	0.0283
1059.25	2.49203	0.01022	2.48115	0.05548	2.42728	0.04797	2.42103	0.03651	2.2988	0.04595	2.31204	0.0371
1333.52	2.45517	-0.0076	2.44928	0.03722	2.36533	0.01888	2.28645	0.01092	2.31368	0.0269	2.24348	0.02611
1678.81	2.47771	0.02214	2.46723	-0.0031	2.3905	0.01999	2.39866	-0.0044	2.31757	0.00334	2.31898	0.0016
2113.5	2.49548	0.00511	2.48494	-0.0032	2.40228	-0.0077	2.38802	0.03353	2.29857	0.00308	2.32385	0.01974
2660.73	2.43662	0.00408	2.45654	-0.0038	2.40214	-0.0019	2.38308	-0.0212	2.32407	0.01832	2.23314	-0.0104
3349.67	2.49314	-0.0117	2.496	0.00937	2.45094	-0.007	2.41977	0.02112	2.33222	0.04276	2.28128	0.00373
4216.98	2.48693	0.00563	2.44639	0.04383	2.38274	-0.0562	2.31831	0.00333	2.27974	-0.0033	2.26472	0.01819
5308.87	2.47371	-0.0132	2.50083	0.02952	2.36932	0.02527	2.36091	0.02204	2.28748	0.0405	2.24815	0.03434
6683.47	2.47982	0.00219	2.50282	-0.0019	2.40109	-0.0163	2.40892	-0.0016	2.31644	-0.0281	2.30158	-0.0048
8413.99	2.38142	-0.0168	2.42315	-0.0336	2.46659	0.03382	2.49633	0.01926	2.3433	0.02561	2.2959	0.05057
10592.59	2.58032	0.03846	2.41884	0.02871	2.3665	0.0219	2.40284	0.00521	2.32176	0.02763	2.21825	-0.0089
13335.28	2.54912	0.03456	2.44386	0.0093	2.44441	0.01479	2.41501	0.01356	2.32537	0.03293	2.23516	-0.0027
16788.12	2.463	-0.0068	2.4555	-0.0106	2.43622	-0.0131	2.35045	-0.0274	2.33663	-0.019	2.28894	0.00239
21135	2.4572	-0.0322	2.52461	0.01998	2.35329	0.01057	2.34374	0.00708	2.30524	-0.0066	2.23859	0.01719
26607.38	2.44007	-0.0109	2.59349	0.03425	2.48157	-0.0287	2.37268	0.04036	2.34202	-0.0002	2.25252	-0.0357
33496.71	2.44092	0.02993	2.46922	-0.0032	2.39437	0.01966	2.3087	0.02282	2.27625	-0.005	2.26543	0.01309
42169.86	2.38764	0.02422	2.40719	-0.0104	2.37734	-0.0107	2.34965	0.02108	2.26909	0.02206	2.23299	0.02849
53088.71	2.44897	0.04675	2.47999	0.06038	2.45019	0.02389	2.34145	0.05069	2.29445	0.02565	2.28167	0.01062
66834.73	2.46169	0.00926	2.52126	0.01779	2.43356	0.02801	2.37125	0.00972	2.31527	0.03159	2.22467	-0.0118
84139.95	2.39736	0.0214	2.38236	0.04174	2.33282	0.01294	2.30096	0.05825	2.244	0.04408	2.1694	0.04396
105925.92	2.46513	0.02026	2.38736	0.0217	2.37797	0.03912	2.32276	0.01584	2.26117	0.02586	2.2406	0.00127
133352.83	2.43648	0.1422	2.50881	0.05641	2.48396	0.02213	2.39209	0.03482	2.28298	0.10256	2.25554	0.04368
167881.27	2.4175	0.04096	2.3506	0.02317	2.31373	0.03274	2.28756	0.04194	2.20367	0.03823	2.16803	0.03186
211349.99	2.45953	0.04466	2.42987	0.02916	2.3736	0.04787	2.27771	-0.0047	2.34504	-0.0093	2.24515	0.02271
266073.88	2.4097	0.05129	2.44961	0.04262	2.42011	0.01783	2.35123	0.01901	2.27946	0.03748	2.27059	0.02784
334967.17	2.36183	0.07519	2.46951	-0.0013	2.34487	0.03957	2.3251	0.07354	2.25501	0.06205	2.20763	0.06871
421698.69	2.4166	0.00224	2.4464	0.01478	2.36545	0.00741	2.3014	0.00953	2.23307	-0.0149	2.18503	-0.0141
530887.19	2.33865	-0.0612	2.30238	0.03639	2.26823	0.03062	2.21589	0.02057	2.21784	0.00659	2.15969	0.02707
668347.38	2.36517	-0.0198	2.35512	-0.0074	2.30246	-0.0126	2.22935	-0.0254	2.25081	0.00216	2.15567	-0.017
841399.5	2.5441	-0.0325	2.45724	-0.0367	2.4645	-0.0416	2.32547	-0.0352	2.34762	0.00927	2.29397	0.0195
1059259.21	2.40587	-0.0031	2.48199	-0.0401	2.35333	0.00021	2.29589	0.00887	2.33144	-0.0092	2.2259	-0.0265
1333528.34	2.54872	-0.013	2.4833	0.01936	2.36939	0.02668	2.3671	0.01807	2.34373	0.02632	2.24647	0.02103
1678812.72	2.41836	0.0388	2.39821	0.0035	2.34154	0.01601	2.2992	0.01082	2.32016	0.01973	2.21855	0.03399
2113499.99	2.495	0.01258	2.44443	0.04024	2.3299	0.01231	2.29712	-0.058	2.36087	0.05406	2.2363	-0.0088

B0

	Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
Celda vacia	1000	30.255	0.021	30.231	0.018	30.232	0.026
	10000	30.231	0.070	30.221	0.087	30.228	0.055
	100000	30.235	-0.013	30.230	-0.016	30.230	-0.017
298K	1000	0.949	-0.004	0.952	-0.001	0.946	-0.003
	10000	0.963	-0.025	0.965	-0.002	0.963	-0.020
	100000	0.968	-0.008	0.968	-0.006	0.967	-0.008
301K	1000	0.941	-0.006	0.938	-0.008	0.939	-0.008
	10000	0.955	-0.011	0.953	-0.027	0.952	-0.018
	100000	0.957	-0.007	0.957	-0.006	0.957	-0.006
303K	1000	0.930	-0.012	0.932	-0.012	0.929	-0.015
	10000	0.946	-0.030	0.949	-0.002	0.947	-0.020
	100000	0.950	-0.006	0.950	-0.006	0.949	-0.006
305K	1000	0.928	-0.011	0.921	-0.007	0.927	-0.008
	10000	0.941	-0.029	0.941	-0.020	0.939	-0.038
	100000	0.945	-0.006	0.942	-0.005	0.942	-0.006
307K	1000	0.927	-0.010	0.925	-0.010	0.922	-0.009
	10000	0.935	-0.030	0.936	-0.026	0.936	-0.034
	100000	0.938	-0.005	0.938	-0.005	0.938	-0.006
309K	1000	0.918	-0.010	0.911	-0.009	0.921	-0.007
	10000	0.932	-0.008	0.927	-0.014	0.927	-0.033
	100000	0.933	-0.006	0.928	-0.005	0.929	-0.005
311K	1000	0.906	-0.011	0.905	-0.012	0.906	-0.009
	10000	0.920	-0.020	0.919	-0.019	0.919	-0.026
	100000	0.922	-0.005	0.922	-0.005	0.920	-0.004
313K	1000	0.898	-0.008	0.902	-0.008	0.899	-0.010
	10000	0.915	-0.030	0.915	-0.029	0.916	-0.020
	100000	0.916	-0.005	0.917	-0.004	0.915	-0.006
315K	1000	0.893	-0.002	0.897	-0.007	0.895	-0.003
	10000	0.910	-0.029	0.909	-0.009	0.907	-0.014
	100000	0.909	-0.004	0.908	-0.007	0.910	-0.004
317K	1000	0.882	-0.005	0.884	-0.009	0.886	-0.006
	10000	0.898	-0.018	0.897	-0.023	0.899	-0.032
	100000	0.899	-0.006	0.899	-0.004	0.900	-0.004
319K	1000	0.882	-0.006	0.884	-0.003	0.880	-0.010
	10000	0.896	-0.020	0.894	-0.020	0.895	-0.006
	100000	0.896	-0.004	0.894	-0.005	0.894	-0.004
321K	1000	0.876	-0.005	0.874	-0.008	0.873	-0.011
	10000	0.890	-0.003	0.885	-0.009	0.885	-0.017
	100000	0.886	-0.004	0.884	-0.005	0.884	-0.003
323K	1000	0.867	-0.008	0.868	-0.008	0.870	-0.005
	10000	0.879	-0.027	0.879	-0.022	0.878	-0.022
	100000	0.878	-0.005	0.877	-0.005	0.878	-0.005
325K	1000	0.862	-0.005	0.864	-0.006	0.864	-0.005
	10000	0.875	-0.016	0.873	-0.020	0.870	-0.003
	100000	0.871	-0.005	0.870	-0.005	0.868	0.000
327K	1000	0.814	-0.004	0.811	-0.001	0.814	-0.009
	10000	0.824	-0.028	0.823	-0.005	0.821	-0.033
	100000	0.827	-0.001	0.827	-0.001	0.827	-0.003
329K	1000	0.813	-0.006	0.806	-0.008	0.811	-0.004
	10000	0.819	-0.025	0.818	-0.020	0.823	-0.008
	100000	0.821	-0.004	0.821	-0.005	0.821	-0.004
331K	1000	0.817	-0.010	0.817	-0.009	0.819	-0.013
	10000	0.820	-0.030	0.822	-0.023	0.824	-0.012
	100000	0.821	0.009	0.823	0.010	0.826	0.011
333K	1000	0.809	-0.014	0.813	-0.014	0.814	-0.011
	10000	0.811	-0.016	0.813	-0.006	0.809	-0.024
	100000	0.819	0.010	0.817	0.011	0.818	0.010

	Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
Celda vacía	1000	30.255	0.021	30.231	0.018	30.217	0.006
	10000	30.231	0.070	30.221	0.087	30.204	0.068
	100000	30.235	-0.013	30.230	-0.016	30.211	-0.012
298K	1000	0.997	0.007	1.002	0.004	0.999	0.004
	10000	1.039	0.019	1.022	0.008	1.024	0.031
	100000	1.024	-0.005	1.024	-0.002	1.028	-0.004
301K	1000	1.000	0.003	0.999	0.003	0.994	0.004
	10000	1.018	-0.007	1.021	0.004	1.029	0.017
	100000	1.021	-0.006	1.019	-0.002	1.019	-0.004
303K	1000	0.990	0.002	0.994	0.002	0.987	0.001
	10000	1.022	-0.005	1.005	0.014	1.009	0.008
	100000	1.013	-0.004	1.013	-0.004	1.005	-0.005
305K	1000	0.975	0.003	0.979	0.000	0.974	0.001
	10000	0.997	0.008	1.006	-0.013	1.007	0.015
	100000	0.996	-0.002	0.996	-0.005	0.996	-0.005
307K	1000	0.971	0.003	0.968	0.001	0.971	0.002
	10000	1.003	0.041	0.991	0.008	0.992	0.037
	100000	0.991	0.001	0.988	-0.003	0.988	-0.004
309K	1000	0.966	0.001	0.969	0.001	0.969	-0.001
	10000	1.019	0.036	0.999	0.014	0.988	0.009
	100000	0.988	-0.006	0.988	-0.002	0.986	-0.004
311K	1000	0.958	0.002	0.960	-0.002	0.959	0.000
	10000	1.001	-0.001	0.991	0.027	0.975	0.009
	100000	0.973	-0.001	0.973	-0.003	0.980	-0.004
313K	1000	0.960	0.001	0.961	-0.001	0.961	-0.001
	10000	0.983	0.014	0.981	0.011	0.977	-0.003
	100000	0.979	-0.005	0.981	-0.004	0.976	-0.003
315K	1000	0.948	-0.001	0.949	0.001	0.953	0.001
	10000	0.973	0.024	0.971	-0.004	0.969	-0.005
	100000	0.970	-0.003	0.969	-0.005	0.970	-0.001
317K	1000	0.949	0.003	0.955	0.002	0.946	-0.003
	10000	0.969	0.005	0.969	0.034	0.969	0.012
	100000	0.964	-0.002	0.963	-0.003	0.965	-0.004
319K	1000	0.941	0.004	0.945	0.003	0.945	-0.002
	10000	0.965	0.002	0.966	0.010	0.971	0.015
	100000	0.963	0.000	0.962	-0.002	0.968	0.000
321K	1000	0.938	0.004	0.938	0.000	0.939	0.002
	10000	0.948	0.023	0.962	0.014	0.963	0.024
	100000	0.955	0.000	0.953	-0.001	0.956	0.004
323K	1000	0.935	0.001	0.925	0.002	0.924	0.000
	10000	0.956	0.019	0.948	0.000	0.938	-0.009
	100000	0.945	-0.002	0.943	-0.002	0.940	-0.002

	Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
Celda vacia	1000	30.255	0.021	30.231	0.018	30.217	0.006
	10000	30.231	0.070	30.221	0.087	30.204	0.068
	100000	30.235	-0.013	30.230	-0.016	30.211	-0.012
298K	1000	1.044	0.001	1.058	0.001	1.056	-0.002
	10000	1.073	0.000	1.073	-0.010	1.074	-0.010
	100000	1.076	-0.004	1.075	-0.004	1.075	-0.003
301K	1000	1.043	-0.002	1.044	-0.002	1.043	0.001
	10000	1.061	-0.010	1.060	-0.009	1.060	-0.018
	100000	1.062	-0.004	1.061	-0.003	1.061	-0.004
303K	1000	1.039	0.004	1.036	-0.001	1.038	0.003
	10000	1.046	-0.008	1.055	-0.010	1.041	-0.009
	100000	1.054	-0.004	1.055	-0.004	1.054	-0.003
305K	1000	1.023	-0.001	-	-	1.032	0.000
	10000	1.048	0.013	-	-	1.049	-0.009
	100000	1.048	-0.003	-	-	1.047	-0.003
307K	1000	1.023	0.000	1.025	-0.002	1.020	-0.001
	10000	1.040	-0.001	1.040	-0.001	1.039	-0.018
	100000	1.039	-0.004	1.039	-0.003	1.040	-0.002
309K	1000	1.017	0.000	1.016	0.001	1.013	-0.002
	10000	1.033	0.007	1.033	-0.003	1.033	0.000
	100000	1.032	-0.003	1.032	-0.003	1.034	-0.003
311K	1000	1.012	-0.005	1.013	-0.003	1.014	-0.004
	10000	1.030	-0.005	1.032	0.016	1.029	-0.022
	100000	1.029	-0.002	1.029	0.000	1.028	-0.002
313K	1000	1.001	-0.004	1.001	-0.001	1.002	-0.003
	10000	1.016	-0.016	1.018	-0.005	1.019	0.002
	100000	1.016	-0.001	1.016	-0.002	1.017	-0.003
315K	1000	0.998	-0.003	1.003	-0.003	1.002	-0.005
	10000	1.020	0.009	1.009	-0.003	1.015	-0.008
	100000	1.010	0.000	1.012	-0.002	1.014	-0.002
317K	1000	0.990	-0.001	0.983	-0.001	0.988	0.000
	10000	1.000	-0.008	1.005	0.028	1.002	-0.008
	100000	1.000	-0.003	1.001	-0.003	1.002	-0.002
319K	1000	0.985	-0.001	0.983	0.002	0.983	0.002
	10000	0.994	-0.008	0.997	-0.009	0.997	0.002
	100000	0.995	-0.002	0.995	-0.003	0.997	-0.001
321K	1000	0.974	0.000	0.973	0.002	-	-
	10000	0.990	-0.008	0.992	0.008	-	-
	100000	0.989	-0.002	0.990	-0.002	-	-
323K	1000	0.967	-0.001	0.967	0.005	0.970	0.000
	10000	0.985	-0.024	0.976	-0.023	0.976	0.018
	100000	0.98567	-0.0012	0.97494	-0.0028	0.97491	-0.0028

B20

	Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
Celda vacia	1000	30.325	0.009	30.332	0.007	-	-
	10000	30.326	0.069	30.320	0.075	-	-
	100000	30.343	-0.013	30.339	-0.012	-	-
298K	1000	1.038	-0.003	1.035	-0.005	1.041	-0.005
	10000	1.050	-0.012	1.057	-0.016	1.056	-0.028
	100000	1.076	-0.008	1.073	-0.008	1.077	-0.007
303K	1000	1.026	-0.003	1.025	-0.005	1.027	-0.005
	10000	1.051	-0.010	1.050	-0.001	1.034	-0.035
	100000	1.065	0.004	1.064	-0.009	1.061	-0.008
308K	1000	1.013	-0.003	1.013	-0.003	1.013	-0.003
	10000	1.046	-0.022	1.029	0.026	1.052	-0.037
	100000	1.048	-0.006	1.052	-0.009	1.051	-0.008
313K	1000	1.002	-0.003	0.999	-0.005	0.998	-0.006
	10000	1.022	-0.008	1.020	-0.007	1.012	-0.016
	100000	1.034	-0.009	1.033	-0.010	1.032	-0.009
318K	1000	0.970	-0.003	0.977	-0.003	0.974	-0.006
	10000	0.994	-0.014	0.995	-0.002	0.994	-0.015
	100000	1.004	-0.011	1.006	-0.010	1.005	-0.010
323K	1000	0.955	-0.004	0.956	-0.007	0.958	-0.006
	10000	0.975	-0.008	0.972	-0.022	0.976	-0.007
	100000	0.984	-0.011	0.984	-0.010	0.985	-0.010
328K	1000	0.939	-0.005	0.937	-0.008	0.942	-0.005
	10000	0.958	-0.006	0.956	-0.003	0.955	-0.011
	100000	0.965	-0.010	0.963	-0.010	0.967	-0.011
333K	1000	0.929	-0.007	0.932	-0.007	0.928	-0.008
	10000	0.940	-0.023	0.941	0.008	0.944	0.001
	100000	0.948	-0.010	0.952	-0.010	0.951	-0.009

B40

	Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
Celda vacia	1000	30.278	0.001	30.281	-0.001	30.281	0.002
	10000	30.274	0.092	30.273	0.068	30.273	0.072
	100000	30.287	-0.013	30.288	-0.012	30.287	-0.014
298K	1000	1.311	-0.008	1.315	-0.011	1.315	-0.010
	10000	1.342	-0.030	1.342	-0.060	1.343	-0.028
	100000	1.356	-0.007	1.358	-0.009	1.358	-0.008
303K	1000	1.286	-0.008	1.288	-0.008	1.288	-0.011
	10000	1.320	-0.027	1.319	-0.014	1.317	-0.012
	100000	1.333	-0.009	1.334	-0.009	1.332	-0.007
308K	1000	1.266	-0.008	1.264	-0.007	1.266	-0.009
	10000	1.297	-0.027	1.294	-0.038	1.296	-0.022
	100000	1.309	-0.009	1.309	-0.009	1.308	-0.009
313K	1000	1.236	-0.009	1.242	-0.009	1.243	-0.010
	10000	1.260	-0.029	1.273	-0.013	1.272	-0.023
	100000	1.281	-0.008	1.285	-0.008	1.284	-0.009
318K	1000	1.202	-0.006	1.201	-0.009	1.205	-0.008
	10000	1.240	-0.038	1.213	-0.037	1.235	-0.036
	100000	1.242	-0.009	1.242	-0.010	1.247	-0.009
323K	1000	1.176	-0.008	1.175	-0.011	1.182	-0.009
	10000	1.205	-0.042	1.212	-0.034	1.213	-0.010
	100000	1.218	-0.009	1.220	-0.009	1.222	-0.009
328K	1000	1.156	-0.008	1.153	-0.005	1.156	-0.008
	10000	1.177	-0.027	1.181	-0.028	1.180	-0.046
	100000	1.191	-0.004	1.189	-0.008	1.190	-0.010
333K	1000	1.144	-0.010	1.150	-0.009	1.151	-0.011
	10000	1.172	-0.040	1.178	-0.023	1.176	-0.031
	100000	1.179	-0.006	1.180	-0.006	1.184	-0.006

B50

	Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
Celda vacía	1000	30.285	0.007	30.286	0.007	30.290	0.006
	10000	30.275	0.075	30.276	0.056	30.278	0.063
	100000	30.290	-0.015	30.292	-0.014	30.291	-0.015
298K	1000	1.442	0.001	1.438	0.000	1.437	0.001
	10000	1.465	-0.004	1.462	-0.020	1.462	-0.020
	100000	1.476	-0.007	1.476	-0.008	1.475	-0.008
303K	1000	1.437	0.000	1.437	0.000	1.439	-0.001
	10000	1.463	-0.004	1.460	-0.016	1.454	-0.019
	100000	1.475	0.003	1.471	-0.010	1.461	0.017
308K	1000	1.429	-0.001	1.430	0.001	1.426	0.000
	10000	1.447	-0.010	1.434	-0.019	1.454	-0.014
	100000	1.466	-0.016	1.462	-0.011	1.456	-0.011
313K	1000	-	-	1.396	-0.002	1.398	-0.002
	10000	-	-	1.423	-0.009	1.422	-0.015
	100000	-	-	1.434	-0.011	1.430	-0.013
318K	1000	1.368	-0.001	1.375	-0.001	1.373	-0.001
	10000	1.398	0.007	1.398	-0.026	1.398	-0.016
	100000	1.408	-0.011	1.407	-0.010	1.406	-0.012
323K	1000	1.350	-0.001	1.352	0.002	1.355	-0.003
	10000	1.378	-0.004	1.376	-0.004	1.372	-0.012
	100000	1.386	-0.016	1.384	-0.011	1.382	-0.009
328K	1000	1.319	-0.003	1.324	-0.001	1.325	0.001
	10000	1.362	0.008	1.345	-0.012	1.344	-0.037
	100000	1.349	-0.014	1.350	-0.012	1.351	-0.013
333K	1000	1.298	0.000	1.302	0.001	1.304	0.006
	10000	1.319	-0.035	1.313	-0.002	1.321	0.008
	100000	1.325	-0.014	1.324	-0.013	1.321	-0.011

B60

	Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
Celda vacía	1000	30.227	0.005	30.227	0.005	30.228	0.008
	10000	30.213	0.082	30.214	0.079	30.214	0.053
	100000	30.222	-0.015	30.222	-0.012	30.223	-0.013
298K	1000	1.533	0.008	1.536	0.005	1.531	0.009
	10000	1.548	-0.032	1.547	-0.027	1.548	-0.006
	100000	1.554	-0.007	1.554	-0.007	1.554	-0.006
303K	1000	1.512	0.005	1.513	0.008	1.510	0.006
	10000	1.526	-0.035	1.525	-0.015	1.523	-0.027
	100000	1.529	-0.003	1.528	-0.006	1.529	-0.009
308K	1000	1.492	0.004	1.488	0.005	-	-
	10000	1.504	-0.003	1.506	-0.016	-	-
	100000	1.503	-0.005	1.510	-0.007	-	-
313K	1000	1.463	0.011	1.459	0.010	1.450	0.011
	10000	1.475	-0.017	1.471	-0.028	1.470	-0.024
	100000	1.478	-0.007	1.473	-0.006	1.472	-0.005
318K	1000	1.423	0.003	1.425	0.007	1.418	0.005
	10000	1.436	-0.003	1.435	-0.016	1.434	0.011
	100000	1.438	-0.005	1.437	-0.005	1.439	-0.003
323K	1000	1.405	0.007	1.399	0.004	-	-
	10000	1.415	-0.025	1.411	-0.008	-	-
	100000	1.412	-0.001	1.412	-0.005	-	-
328K	1000	1.379	0.008	1.376	0.004	1.375	0.002
	10000	1.391	-0.008	1.388	-0.021	1.389	-0.003
	100000	1.380	-0.004	1.384	-0.006	1.385	-0.004
333K	1000	1.370	0.006	1.363	0.007	1.362	0.006
	10000	1.372	-0.012	1.372	-0.022	1.365	-0.017
	100000	1.362	-0.004	1.362	-0.002	1.359	-0.003

B80

	Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
Celda vacía	1000	30.281	0.005	30.285	0.012	30.287	0.009
	10000	30.269	0.081	30.269	0.046	30.269	0.058
	100000	30.279	-0.010	30.280	0.001	30.277	0.003
298K	1000	1.723	0.005	1.720	0.003	1.722	0.004
	10000	1.738	-0.020	1.737	-0.020	1.737	-0.019
	100000	1.748	-0.013	1.747	-0.012	1.747	-0.012
303K	1000	1.692	0.002	1.693	0.001	1.691	0.001
	10000	1.712	0.010	1.708	-0.039	1.708	-0.023
	100000	1.716	-0.013	1.716	-0.011	1.715	-0.012
308K	1000	1.672	0.004	1.670	0.001	1.673	0.001
	10000	1.685	-0.026	1.687	-0.011	1.686	-0.022
	100000	1.689	-0.011	1.688	-0.011	1.690	-0.011
313K	1000	1.651	0.000	1.644	0.003	1.646	-0.001
	10000	1.661	-0.012	1.661	-0.020	1.659	-0.016
	100000	1.663	-0.011	1.664	-0.009	1.661	-0.012
318K	1000	1.628	0.001	1.627	0.005	1.625	0.002
	10000	1.639	0.002	1.635	-0.029	1.635	-0.013
	100000	1.635	-0.011	1.635	-0.009	1.635	-0.009
323K	1000	1.576	0.004	1.578	0.004	1.581	0.001
	10000	1.598	-0.016	1.593	-0.011	1.591	-0.005
	100000	1.590	-0.010	1.588	-0.009	1.593	-0.010
328K	1000	1.556	0.006	1.559	0.000	1.557	0.007
	10000	1.563	-0.017	1.563	-0.019	1.566	-0.022
	100000	1.556	-0.010	1.558	-0.010	1.563	-0.009
333K	1000	1.537	0.008	1.534	0.013	1.538	0.010
	10000	1.536	-0.029	1.533	-0.019	1.535	-0.011
	100000	1.528	-0.007	1.528	-0.008	1.531	-0.008

B100

	Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
Celda vacía	1000	30.283	0.003	30.292	0.002	30.294	0.002
	10000	30.248	0.054	30.263	0.047	30.267	0.061
	100000	30.258	0.000	30.257	-0.002	30.255	0.003
301K	1000	1.867	0.002	1.872	0.019	1.876	0.006
	10000	1.939	0.010	1.933	0.015	1.944	0.013
	100000	1.953	-0.023	1.921	0.046	1.999	-0.013
303K	1000	1.875	0.009	1.888	0.009	1.878	0.005
	10000	1.954	-0.007	1.961	-0.013	1.952	0.006
	100000	1.971	0.049	1.946	0.046	1.957	-0.033
313K	1000	1.817	0.002	1.796	0.003	1.806	0.014
	10000	1.888	0.013	1.870	0.014	1.875	0.018
	100000	1.906	-0.001	1.890	0.027	1.898	-0.003
323K	1000	1.750	0.002	1.760	0.011	1.745	0.015
	10000	1.815	-0.005	1.791	0.007	1.798	0.017
	100000	1.819	-0.019	1.825	0.040	1.846	0.021
333K	1000	1.688	0.018	1.681	0.012	1.673	0.018
	10000	1.754	0.021	1.747	0.029	1.745	0.021
	100000	1.743	-0.027	1.738	-0.019	1.761	0.004

GASOIL SHELL (B10)

	Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
Celda vacía	1000	30.301	0.012	30.305	0.011	30.309	0.015
	10000	30.287	0.050	30.290	0.055	30.293	0.070
	100000	30.297	-0.014	30.299	-0.017	30.300	-0.016
298K	1000	1.083	0.004	1.085	0.003	1.079	0.004
	10000	1.094	0.017	1.095	0.022	1.094	0.027
	100000	1.093	-0.007	1.093	-0.007	1.094	-0.007
303K	1000	1.065	0.006	1.067	0.004	1.066	0.004
	10000	1.076	0.022	1.089	-0.007	1.075	-0.005
	100000	1.076	-0.007	1.074	-0.006	1.071	-0.007
308K	1000	1.049	-0.008	1.047	-0.006	1.048	-0.004
	10000	1.058	-0.015	1.061	0.028	1.057	0.015
	100000	1.059	-0.005	1.059	-0.006	1.056	-0.006
313K	1000	1.035	-0.004	1.035	-0.003	1.029	-0.003
	10000	1.038	0.012	1.045	0.048	1.041	0.010
	100000	1.041	-0.005	1.037	-0.003	1.037	-0.004
318K	1000	0.992	0.006	0.996	0.008	0.998	0.007
	10000	1.006	-0.003	0.993	0.035	1.003	0.040
	100000	0.994	-0.005	0.998	-0.006	1.001	-0.004
323K	1000	0.977	0.010	0.976	0.007	0.979	0.008
	10000	0.986	0.033	0.975	0.007	0.992	-0.017
	100000	0.980	-0.006	0.981	-0.005	0.981	-0.002
328K	1000	0.967	0.008	0.969	0.008	0.970	0.017
	10000	0.968	0.016	0.974	0.011	0.974	0.019
	100000	0.971	-0.004	0.970	-0.004	0.970	-0.005
333K	1000	0.964	0.010	0.971	0.007	0.972	0.011
	10000	0.980	0.000	0.957	0.023	0.969	0.019
	100000	0.968	-0.002	0.964	-0.003	0.961	-0.003

GASOIL PETROBRAS (B10)

	Frecuencia [Hz]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]	$\Delta C'$ [pF]	$\Delta C''$ [pF]
Celda vacía	1000	30.328	0.006	30.305	0.011	30.309	0.015
	10000	30.292	0.076	30.290	0.055	30.293	0.070
	100000	30.321	-0.012	30.299	-0.017	30.300	-0.016
298K	1000	1.072	0.008	1.078	0.008	1.076	0.010
	10000	1.107	-0.035	1.107	-0.025	1.099	-0.010
	100000	1.090	-0.007	1.089	-0.006	1.090	-0.007
303K	1000	1.065	0.020	1.055	0.020	1.067	0.021
	10000	1.086	0.017	1.068	-0.012	1.103	-0.011
	100000	1.074	-0.009	1.076	-0.008	1.079	-0.007
308K	1000	1.056	0.013	1.058	0.008	1.054	0.004
	10000	1.088	0.008	1.084	-0.017	1.068	-0.004
	100000	1.067	-0.006	1.064	-0.007	1.063	-0.007
313K	1000	1.024	0.014	1.027	0.013	1.028	0.006
	10000	1.052	-0.009	1.053	0.018	1.039	-0.025
	100000	1.029	-0.006	1.030	-0.007	1.029	-0.007
318K	1000	1.005	0.023	0.996	0.008	1.004	0.021
	10000	1.061	-0.024	0.993	0.035	1.054	-0.022
	100000	1.006	-0.006	0.998	-0.006	1.005	-0.008
323K	1000	0.994	0.032	0.993	0.027	0.990	0.022
	10000	1.007	-0.013	0.983	0.018	1.019	0.001
	100000	0.996	-0.006	0.989	-0.005	0.990	-0.005
328K	1000	0.974	0.019	0.978	0.015	0.986	0.020
	10000	1.005	-0.018	0.986	0.010	1.005	0.019
	100000	0.978	-0.004	0.978	-0.004	0.973	-0.004
333K	1000	0.984	0.023	0.983	0.022	0.986	0.023
	10000	0.995	-0.020	1.007	0.013	1.007	0.000
	100000	0.969	-0.003	0.977	-0.001	0.977	-0.003

ANEXO 6: PROCESAMIENTO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

1. INCERTEZA CUADRÁTICA MEDIA (RMS)

La incerteza RMS de la estimación obtenida a partir de un modelo, ϵ , se define como

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum_i^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N-1}} \quad (\text{A.6.1})$$

donde y_i ($i=1$ a N) es valor del i -ésimo dato experimental e \hat{y}_i es el valor estimado por el modelo. El error RMS tiene las unidades de la variable y .

En particular, la obtención de los parámetros de ajuste de las partes real e imaginaria de la Ec. III.20 emplea la Ec. A.6.1. A continuación se detalla el uso de la Ec. A.6.1 para tal fin. Para la obtención de la parte real, la Ec. A.6.1 es

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum_i^N (\epsilon'_{ri} - \epsilon'_r)^2}{N-1}}$$

donde N es el número de datos experimentales ($N>1$), ϵ'_{ri} es el valor de la parte real de la permitividad correspondiente a la frecuencia angular ω_i ($i=1 \dots N$) y ϵ'_r es el parámetro a determinar (supuesto constante en el modelo). La determinación se lleva a cabo con un método numérico iterativo.

Para la obtención de la parte imaginaria de la Ec. III.20, la Ec. A.6.1 es,

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum_i^N \left[\epsilon''_{ri} - \left(\epsilon''_{pol} + \frac{\sigma}{\epsilon_o \omega_i} \right) \right]^2}{N-1}}$$

donde ϵ''_{ri} es el valor de la parte imaginaria de la permitividad correspondiente a la frecuencia angular ω_i ($i=1 \dots N$), N es el número de datos experimentales, y ϵ''_{pol} y σ

son los parámetros a determinar (supuestos constantes en el modelo). Como antes, la determinación se lleva a cabo con un método numérico iterativo.

2. AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE LOS MODELOS LINEALES

Los ajustes de los parámetros de los modelos lineales presentados en esta tesis se llevaron a cabo utilizando el método de cuadrados mínimos. En el caso de variables relacionadas a través de dependencias no lineales, como paso previo a la aplicación del método, aquellas fueron llevadas a una forma lineal mediante cambios de variables.

Si se tiene N pares de valores experimentales $P_i=(x_i, y_i)$, y se supone que la dependencia entre las variables x e y es lineal ($y = ax + b$) los parámetros a y b dependen de los valores experimentales, x_i, y_i , según:

$$a = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

La incerteza de los parámetros a y b están dadas por [1]:

$$\Delta a = s \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{\bar{x}^2}{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}}}$$

$$\Delta b = \frac{s}{\sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}}}$$

donde

$$s = \sqrt{\frac{\sum \epsilon_i^2}{N - 2}}$$

y

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}$$

El coeficiente de correlación o determinación, R^2 , se calcula como:

$$R^2 = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

El mismo es una medida del grado de correlación entre las variables x e y . En la práctica se suele considerar que se tiene una correlación “buena” si $R^2 > 0.9$ [1,2].

REFERENCIAS

- [1] Baird DC. Experimentación. Una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos. Prentice-Hall Hispanoamericana, México DF, 1991.
- [2] Roederer JG. Mecánica elemental. Eudeba, Buenos Aires, 2002.
- [3] Walpole. Probability & Statistics for Engineers & Scientists. Pearson Prentice Hall, Londres, 2007.

ANEXO 7: OTRAS TÉCNICAS EXPERIMENTALES

En este anexo se describen las técnicas experimentales empleadas para la determinación de la velocidad del sonido y de la viscosidad cinemática de líquidos, y se discute la relevancia de ambas propiedades.

Las mediciones de velocidad del sonido presentadas en esta tesis, fueron realizadas por el Ing. Martín Arolfo durante el desarrollo de su Tesis de Ingeniería Mecánica, llevada a cabo en el GER [1], mientras que los datos de viscosidad cinemática provienen de las mediciones llevadas a cabo por la Ing. Martina Colman, integrante del GER [2].

VELOCIDAD DEL SONIDO

El principio de funcionamiento del interferómetro utilizado para determinar la velocidad del sonido en el fluido, en el GER, es conceptualmente similar al tubo de Kundt, utilizado para medir la velocidad del sonido en aire. Básicamente se trata de determinar las longitudes del resonador cilíndrico (tubo) a las cuales se observan resonancias, desplazando el pistón de cierre del mismo. Como el tubo es excitado por una fuente sonora de frecuencia conocida, la determinación de la velocidad del sonido se basa en medir las longitudes consecutivas del resonador donde tienen lugar las resonancias.

El resonador utilizado para obtener las mediciones analizadas en este trabajo es un tubo de acero cerrado en uno de sus extremos por un pistón que puede desplazarse en su interior, en tanto en el otro extremo se encuentra el transductor piezoeléctrico. El desplazamiento del pistón modifica la longitud del resonador. El pistón se acciona con un micrómetro de 25mm de carrera y una precisión de 10 μ m. La excitación se genera en el

transductor piezoeléctrico mencionado, con resonancias eléctricas a las frecuencias de 1.8 MHz, 5.6MHz y 9.3MHz. El resonador se termostatiza con una camisa por la cual circula el agua de un baño termostático. La incerteza de las mediciones es de ± 1 m/s. Una descripción muy detallada del dispositivo empleado y de su funcionamiento, se encuentra en la Tesis de Ingeniería del Ing. Jakobi [9,10] y en la Tesis de Doctorado del Dr. Ing. Sorichetti [11]. En la Figura A.7.1 se muestra un esquema del interferómetro.

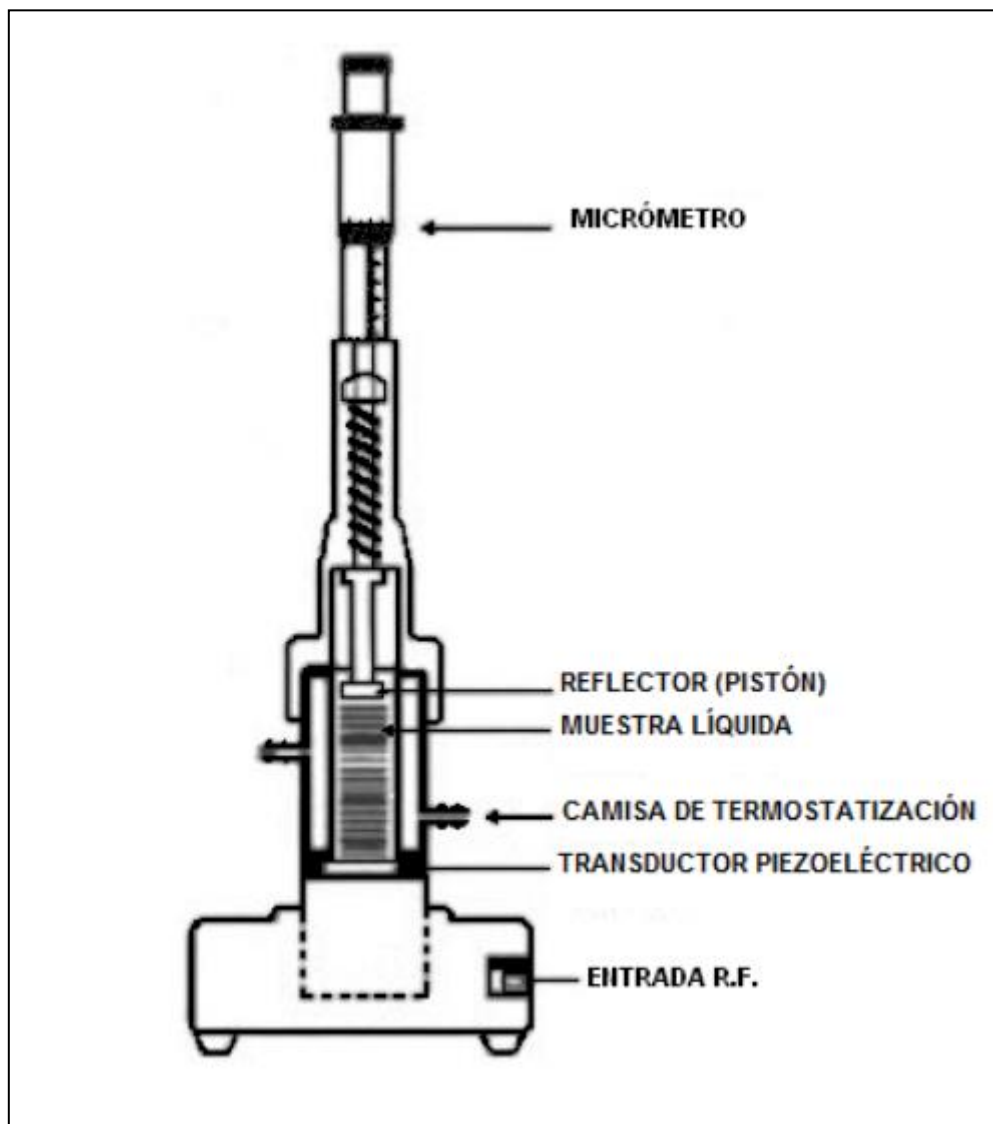


Figura A.7.1 - Esquema del interferómetro.

En la Figura A.7.2 se muestra el esquema experimental para la medición de la velocidad del sonido en líquidos [11].

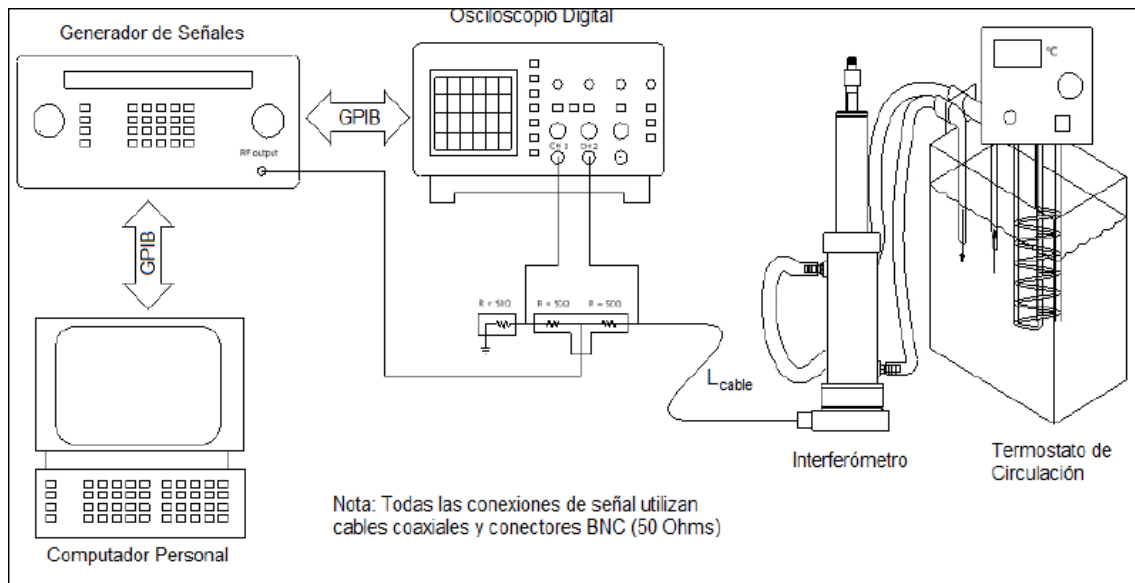


Figura A.7.2 - Esquema experimental para la medición de la velocidad del sonido en líquidos [11].

En cuanto al procedimiento experimental, en primer lugar se fija la primera temperatura de medición con un cabezal termostático y se introduce la sustancia a medir en el resonador. Luego se cierra el resonador, y se verifica que el micrómetro haga contacto con la muestra introducida. El tiempo de estabilización de la temperatura de la muestra es de entre 45 y 60 minutos. Una vez estabilizada la misma, se registra con el osciloscopio la variación de la impedancia eléctrica del transductor en función de la posición del pistón. Dicha impedancia es una función periódica de la posición del pistón, lo que permite determinar la longitud de onda del sonido en el fluido. Dado que se conoce la frecuencia de excitación, es posible determinar la velocidad de propagación del sonido en el medio [1]. A cada temperatura, las mediciones se realizan con pasos de 0.01mm, en un total de 2mm, dando lugar a 200 mediciones por temperatura.

Dado que se verificó que las velocidades del sonido obtenidas no mostraron variaciones apreciables entre las distintas frecuencias de medición (dentro del error experimental) los resultados analizados corresponden a 9.43MHz. En todas las muestras estudiadas en este trabajo, se observa que la velocidad del sonido, $v(T)$, decrece con la temperatura y que los valores experimentales se ajustan muy bien a una dependencia lineal con la temperatura:

$$v(T)=v(T_o)+dv/dT(T-T_o) \quad (A.7.1)$$

donde las unidades de $v(T)$ son ms^{-1} , $v(T_o)$ es la velocidad del sonido a la temperatura de referencia ($T_o=318\text{K}$) expresada en ms^{-1} , y dv/dT es el coeficiente de temperatura de la velocidad expresado $\text{ms}^{-1}\text{K}^{-1}$, a la temperatura de referencia T_o .

VISCOSIDAD CINEMÁTICA

La viscosidad cinemática de un fluido se define como el cociente entre la viscosidad dinámica del mismo y su densidad. La viscosidad dinámica puede definirse como la fuerza que debe ejercerse entre dos capas paralelas de superficie A , situadas a una distancia d , para mantener una velocidad v de una capa sobre la otra [12].

Cabe destacar que la viscosidad cinemática es un parámetro de gran importancia tecnológica, ya que afecta la atomización del combustible, el tiempo de inyección del combustible en los motores Diesel, su performance, las emisiones de NO_x y la formación de residuos en el tanque [3,4,5,6,7,8].

La medición de la viscosidad cinemática se suele efectuar midiendo el tiempo de escurrimiento de un volumen de fluido bajo la influencia de la gravedad. El arreglo experimental utilizado en esta tesis para la determinación de la viscosidad cinemática se representa en la Figura A.7.3. En el mismo, se muestra el viscosímetro sumergido en un baño térmico con temperatura controlada dentro de $\pm 0.1\text{K}$. Es fundamental que la temperatura se controle de manera muy precisa, ya que la viscosidad depende fuertemente de la temperatura [8,13,14,15].

El procedimiento de medición consiste en cargar un volumen conocido de muestra por el lado derecho del viscosímetro (ver Figura A.7.3), y succionarlo a través del capilar del lado izquierdo con una propipeta, hasta que el líquido pase la marca superior. Luego se retira la propipeta, y se mide el tiempo de escurrimiento, T_{esc} , definido como el tiempo que transcurre entre el instante en el cual la interfaz superior del líquido pasa por la marca superior del viscosímetro, y el instante en el cual pasa por la marca inferior.

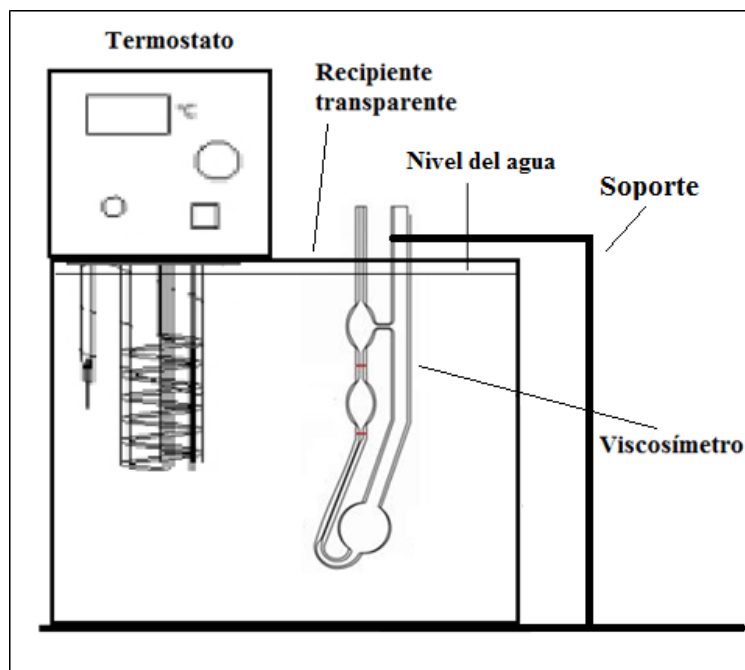


Figura A.7.3 - Esquema experimental para la medición de la viscosidad cinemática.

La determinación de la viscosidad cinemática se llevó a cabo utilizando un viscosímetro Cannon-Fenske tamaño N° 50 [16]. En todos los casos se trabajó con 10ml de muestra. El tiempo de escurrimiento del líquido, T_{esc} , se midió con un cronómetro digital con resolución de centésimas de segundo. El tiempo de termostatización de las muestras a cada temperatura fue superior a 30 minutos en todos los casos a fin de asegurar que se hubiese alcanzado el equilibrio térmico entre la muestra y el baño térmico. La verticalidad del viscosímetro es importante para la exactitud de las mediciones. En esta tesis se verificó con una plomada.

En la Tabla A.7.1 se muestran los tiempos de escurrimiento de todas las muestras, medidos mediante un cronómetro con exactitud de 0.01s, a cada temperatura de medición [2].

Muestra	T _{esc} [s]				
	298K	303K	308K	313K	318K
B0	1443.8	1297.7	1172.7	1070.9	958.3
B10	1528.7	1373.0	1240.4	1128.5	1030.3
B20	1624.6	1468.7	1326.2	1204.0	1096.9
B30	1734.2	1554.0	1399.7	1272.3	1160.2
B40	1840.3	1647.3	1483.4	1345.4	1224.2
B50	1981.7	1761.0	1593.1	1437.4	1305.8
B60	2094.7	1870.0	1678.2	1515.2	1378.3
B70	2259.0	2015.9	1812.0	1634.2	1496.4
B80	2395.1	2126.4	1908.3	1716.3	1554.8
B90	2528.5	2263.5	2024.3	1825.5	1652.9
B100	2706.0	2400.7	2146.0	1939.3	1758.2

Tabla A.7.1 - Tiempo de escurrimiento [s] de las mezclas biodiesel/gasoil a cada temperatura de medición [2].

El valor de la viscosidad de las muestras a cada temperatura se obtiene como el cociente entre el tiempo de escurrimiento, y una constante de calibración que depende del viscosímetro. La constante de calibración se determina por norma realizando mediciones con agua purificada a 313K.

Como era esperable, en todos los casos analizados en este trabajo se observó que el valor de la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura.

En esta tesis, se ajustó la viscosidad cinemática de las mezclas biodiesel/gasoil en función de la temperatura mediante un modelo de Arrhenius [167,18],

$$\eta(T) = Ae^{\frac{E_a}{kT}} \quad (\text{A.7.2})$$

donde η y A están en mm^2s^{-1} , T es la temperatura absoluta (K), E_a es la energía de activación de la viscosidad (eV) y k es la constante de Boltzmann ($8.617332 \times 10^{-5} \text{ eVK}^{-1}$).

REFERENCIAS

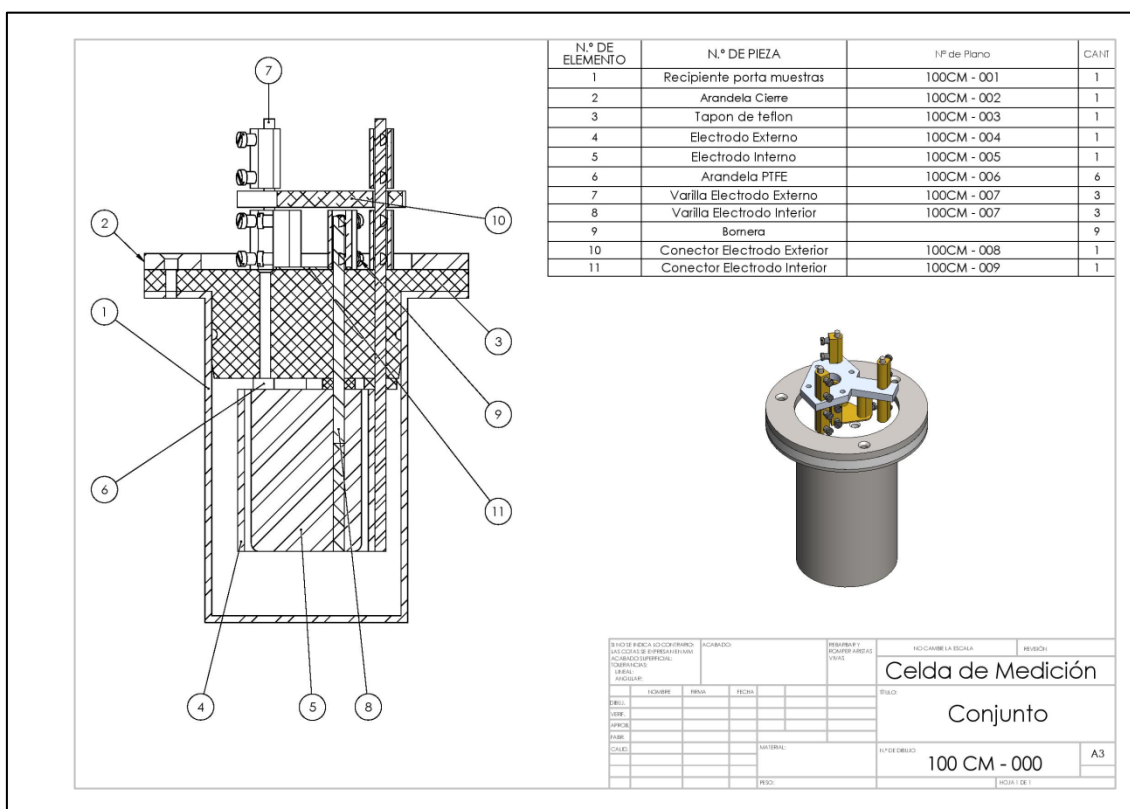
- [1] Arolfo M. Aplicación de técnicas ultrasónicas para la medición de propiedades de aceites y metilésteres de origen vegetal. Tesis de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, 2013.
- [2] Colman M. Informe de Actividades, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, 2017.
- [3] Tat M, Gerpen J. Measurement of biodiesel speed of sound and its impact on injection timing. National renewable energy laboratory 2003; NREL/SR-510-31462.
- [4] Albo GPA, Lago S. Experimental speed-of-sound measurements of pure fatty acids methyl ester, mineral diesel and blends in a wide range of temperature and for pressures up to 300 MPa. Fuel 2014;115:740-748.
- [5] Lopes AFG, Talavera-Prieto MC, Ferreira AGM, Santos JB, Santos MJ, Portugal ATG. Speed of sound in pure fatty acid methyl esters and biodiesel fuels. Fuel 2014;116:242–254.
- [6] Freitas SVD, Paredes MLL, Daridon JL, Lima AS, Coutinho JAP. Measurement and prediction of the speed of sound of biodiesel fuels. Fuel 2013;103:1018-1022.
- [7] Freitas SVD, Santos A, Moita MLCJ, Follegatti-Romero LA, Dias TPVB, Meirelles AJA, Daridon JL, Lima AS, Coutinho JAP. Measurement and prediction of speeds of sound of fatty acid ethyl esters and ethylic biodiesels. Fuel 2013;108:840–845.
- [8] Knothe G, Krah J, van Gerpen J. The Biodiesel Handbook 2nd Edition. Ed. Urbana: AOCS Press, Urbana, 2011.

- [9] Jakobi DS, Sorichetti PA, Romano SD. Estudio de propiedades dieléctricas de aceites vegetales. Jornadas de Jóvenes Investigadores AUGM (Asociación de Universidades Grupo Montevideo), Santa Fe, Argentina, 2010.
- [10] Jakobi DS. Mediciones de propiedades en fluidos mediante Técnicas Ultrasónicas. Tesis de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, 2010.
- [11] Sorichetti PA. Técnicas dieléctricas en el estudio de transiciones de fase de fluidos complejos. Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, 2012.
- [12] Glasstone S, Lewis D. Elementos de Química Física. El Ateneo, Bogota, 1960.
- [13] Romano SD, González Suárez E, Laborde MA. Combustibles alternativos. 2nd ed. Buenos Aires: Ediciones Cooperativas, 2006.
- [14] Romano SD, Sorichetti PA. Dielectric relaxation spectroscopy in biodiesel production and characterization. Springer Verlag, Londres, 2011.
- [15] Scheider JC. Fuel composition and quality sensing for diesel engines. Tesis de Maestría. Universidad de Illinois, Urbana-Champaign, 2011.
- [16] ASTM D445-17, Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), ASTM International, West Conshohocken, PA; 2017.
- [17] Andrade ENC. The viscosities of liquids. Nature 1930;3148(125):310-311.
- [18] Eyring H. Viscosity, Plasticity, and Diffusion as Examples of Absolute Reaction Rates. Journal of Chemical Physics 1936;4:283-291.

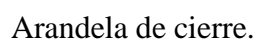
ANEXO 8: PLANOS DE LA CELDA DE MEDICIÓN

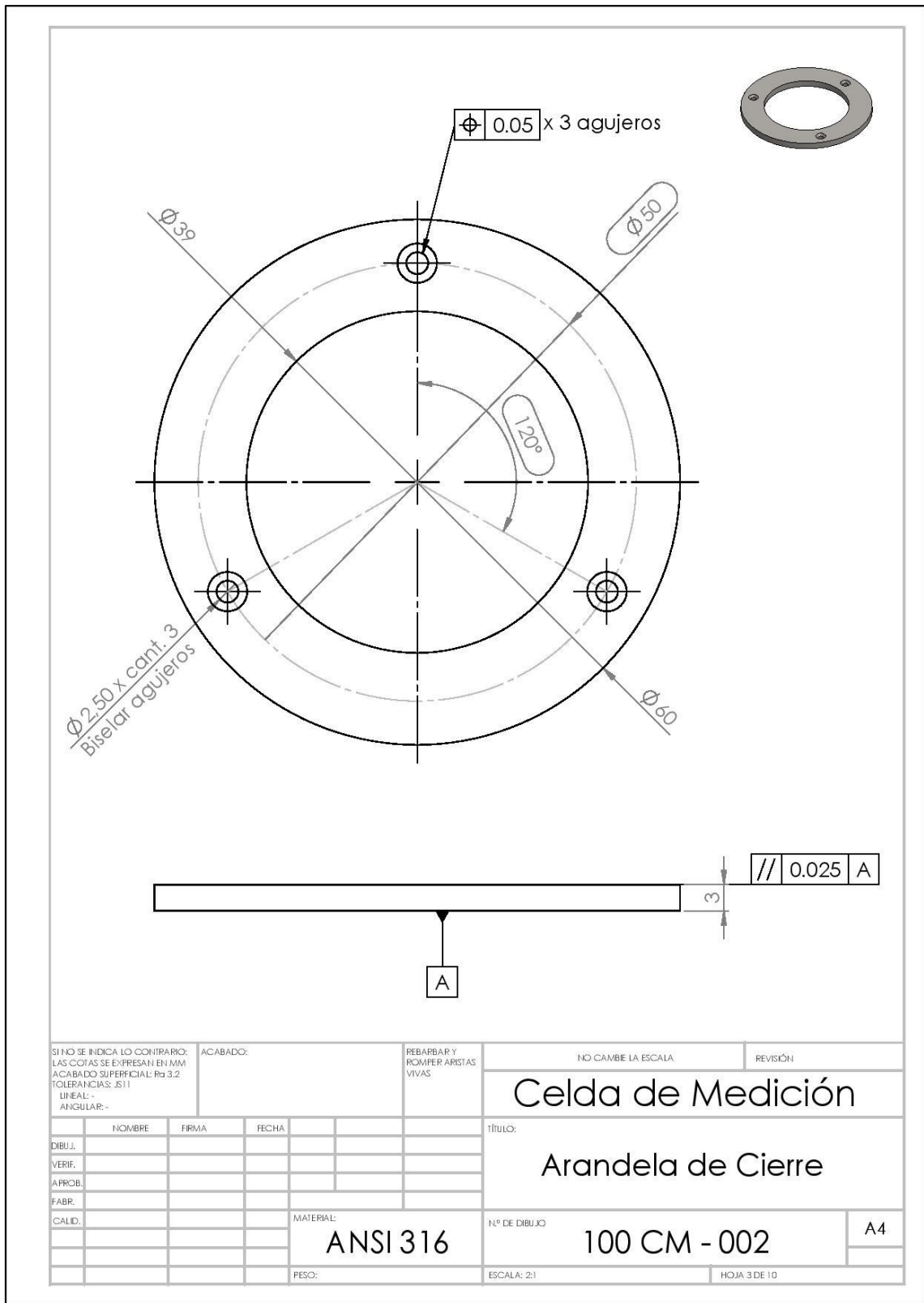
Los planos presentados en este anexo fueron realizados por el Ing. Eriel Fernández Galván, integrante del GER.

Corte de la celda ensamblada y vista general.

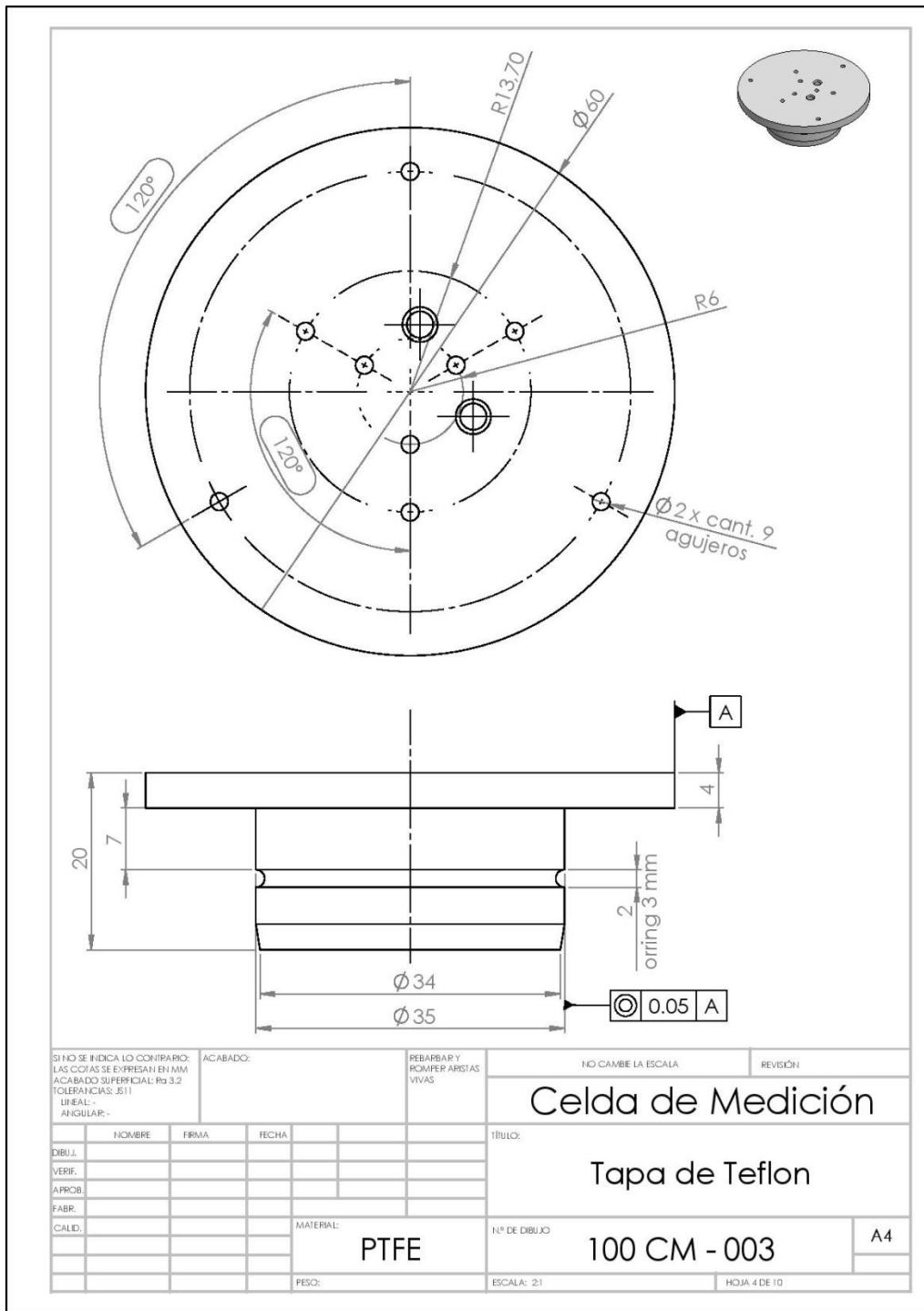


Recipiente portamuestras: corte y vista superior.

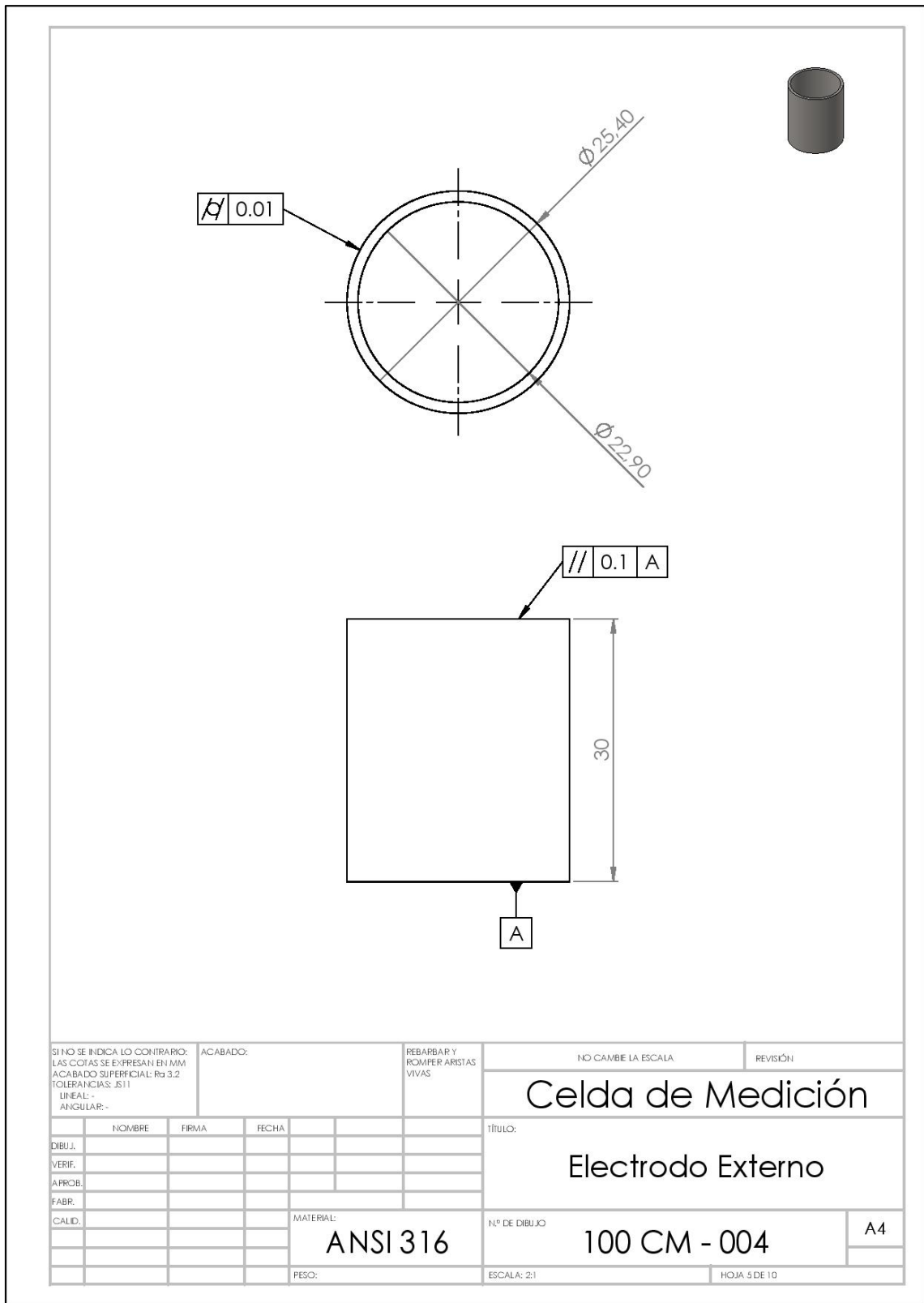




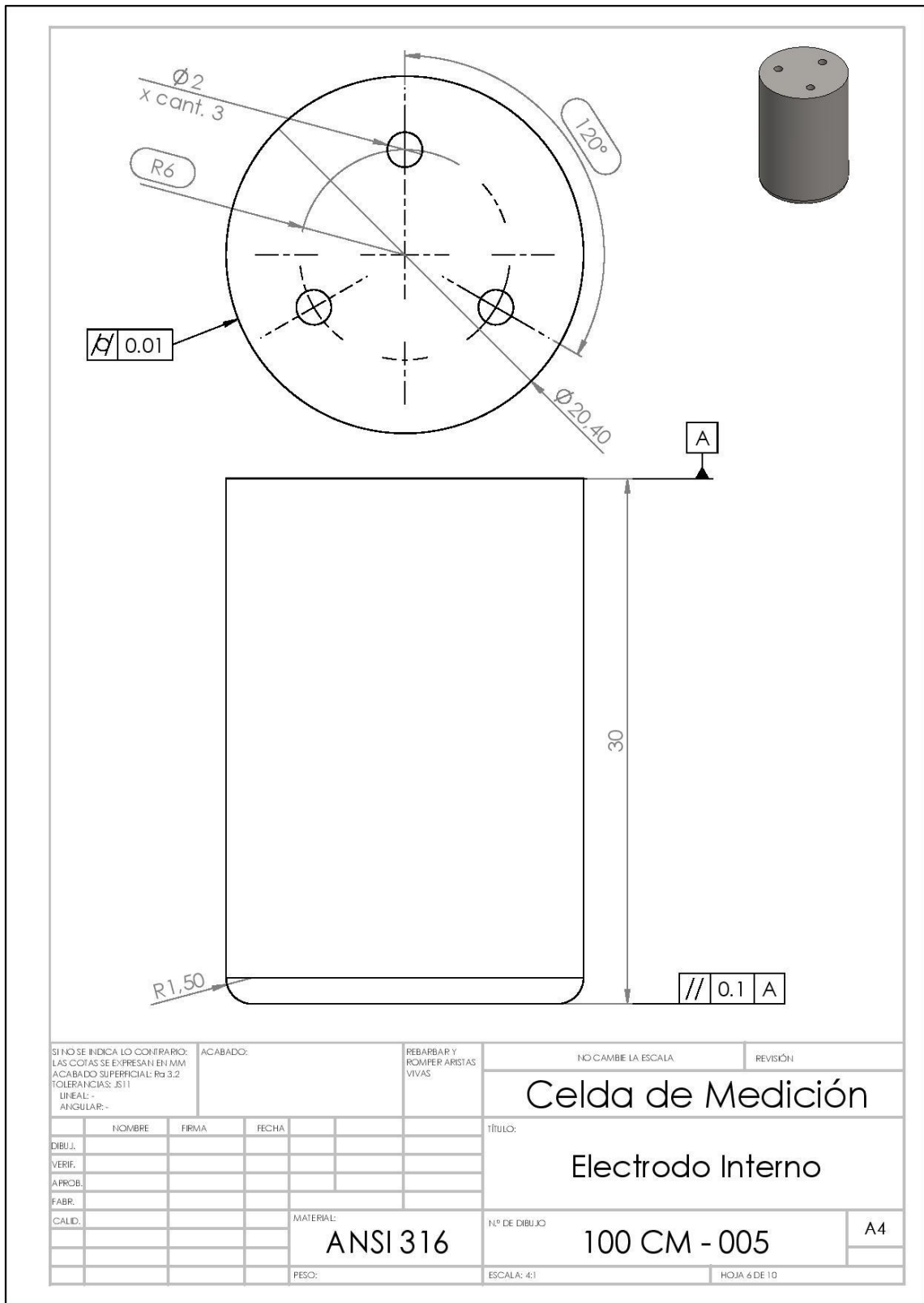
Tapón de PTFE: vista superior y lateral.



Electrodo exterior: vista superior y lateral.



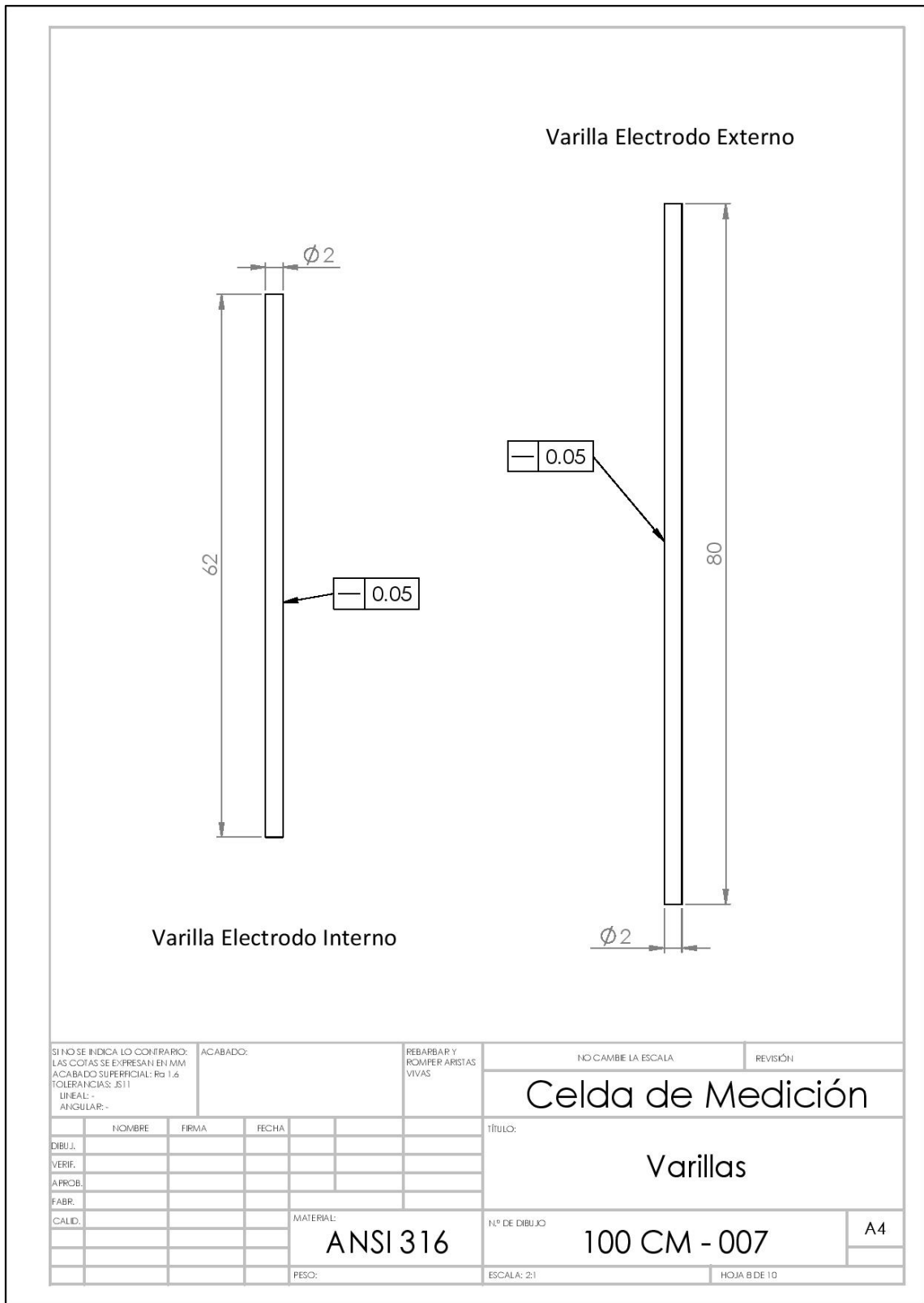
Electrodo interno: vista superior y lateral.



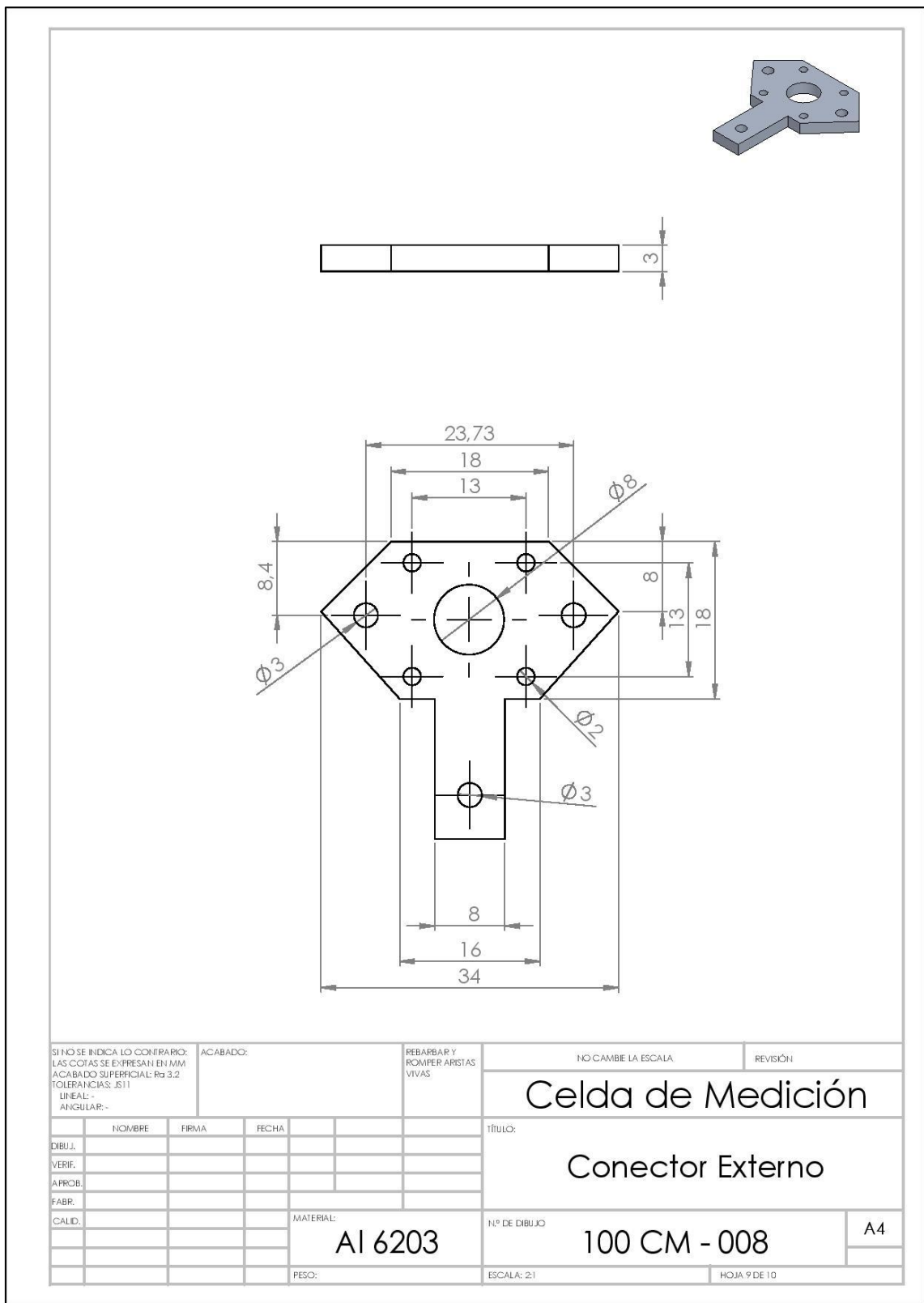
Arandela de PTFE: vista superior y lateral.

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: Ra 3.2 TOLERANCIAS: JS11 LINEAL: - ANGULAR: -				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBE LA ESCALA		REVISIÓN	
<h2 style="margin: 0;">Celda de Medición</h2>								TÍTULO:			
<h2 style="margin: 0;">Arandela Teflón</h2>								N.º DE DIBUJO			
<h2 style="margin: 0;">PTFE</h2>								<h2 style="margin: 0;">100 CM - 006</h2>			
PESO:								ESCALA: 20:1			
								HOJA 7 DE 10			

Varillas de acero



Conector de aluminio: vista lateral y superior.



Conector: vista superior y lateral.

